FACULTÉ DE MÉDECINE DE STRASBOURG

ANNÉE 1931 N° 23

Thèse présentée pour le Doctorat en médecine

par

GENEVIEVE ACHARD

Née à Paris, le 18 Juin 1898.

Licenciée ès Sciences.
Assistante à l'Institut de Physique biologique de la Faculté de Médecine de Strasbourg.
Attachée scientifique au Laboratoire de l'Institut d'Hydrologie thérapeutique et Climatologie de Strasbourg.

Contribution à l'Etude des Propriétés Physiques des Suspensions d'hématies.

Président: Mr. VLES Professeur

STRASBOURG
Librairie Universitaire d'Alsace
1931

FACULTÉ DE MÉDECINE DE STRASBOURG

ANNÉE 1931 N° 23

Thèse présentée pour le Doctorat en médecine

par

GENEVIEVE ACHARD

Née à Paris, le 18 Juin 1898.

Licenciée ès Sciences.
Assistante à l'Institut de Physique biologique de la Faculté de Médecine de Strasbourg.
Attachée scientifique au Laboratoire de l'Institut d'Hydrologie thérapeutique et Climatologie de Strasbourg.

Contribution à l'Etude des Propriétés Physiques des Suspensions d'hématies.

Président: Mr. VLES Professeur

STRASBOURG
Librairie Universitaire d'Alsace
1931

FACULTE DE MEDECINE DE STRASBOURG

Doyen	MM.	MERKLEN ✲ ⁂ I.
Assesseur		NICLOUX ✲ ⁂ I.

Professeurs

Embryologie	MM.	ANCEL ✲ ⁂ I.
Anatomie		FORSTER ✲ ⁂ I.
Histologie		BOUIN O. ✲ ⁂ I.
Physiologie		SCHAEFFER ⁂ I.
Physique biologique		VLES ✲ ⁂ I.
Chimie biologique		NICLOUX ✲ ⁂ I.
Anatomie pathologique		MASSON ✲ ⁂ I.
Pharmacologie, Médecine expérimentale		N.....
Hygiène, Bactériologie		BORREL C. ✲ ⁂ A.
Médecine légale		CHAVIGNY C. ✲ ⁂ I.
Clinique médicale		MERKLEN ✲ ⁂ I.
		AMBARD ✲ ⁂ I.
Clinique chirurgicale		LERICHE O. ✲ ⁂ I.
		STOLZ ✲ ⁂ I.
Clinique ophtalmologique		WEILL ⁂ I.
Clinique dermatologique		PAUTRIER O. ✲ ⁂ I.
Clinique psychiatrique		PFERSDORFF ✲ ⁂ I.
Clinique neurologique		BARRE ✲ ⁂ I.
Clinique gynécologique et accouchements		REEB ⁂ I.
Clinique infantile		ROHMER ✲ ⁂ I.
Clinique oto-rhino-laryngologique		CANUYT ⁂ A.

Professeurs sans chaire:

MM.	ARON Max ⁂ I.	MM. FONTES ⁂ A.
	BELLOCQ ⁂ I.	GERY ⁂ A.
	SCHWARTZ ⁂ I.	

Chargés de cours et Agrégés:

MM.	BENOIT	MM. KREISS
	BLUM (Paul) O. ✲ ⁂ I.	LARROUSSE ⁂ A.
	GELMA ⁂ A.	REISS
	GUNSETT ✲ ⁂ A.	SIMON ✲ ⁂ A.
	HANNS ✲ ⁂ A.	SIMONIN ✲.
	HUMBERT ✲ ⁂A.	VAUCHER ⁂ A.
	KAYSER	WEISS A.
	KELLER ⁂ A.	

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Chargés d'un cours complémentaire:

MM. A. BOECKEL ✲, MEYER M., ROEDERER

Serment d'Hippocrate.

En présence des maîtres de cette école, de mes chers condisciples, je promets et je jure au nom de l'Être suprême d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la médecine. Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail.

Admis dans l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe.

Ma langue taira les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas à corrompre les moeurs ni à favoriser le crime.

Respectueux et reconnaissant envers mes maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leurs pères.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis resté fidèle à mes promesses! Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque

A LA MÉMOIRE DE MON PÈRE

A MA MÈRE

A MON FRÉRE

A MA FAMILLE ET A MES AMIS.

A NOTRE MAITRE

MONSIEUR LE PROFESSEUR F. VLÈS
Chevalier de la Légion d'Honneur,

qui m'a orientée dans la recherche scientifique et qui m'a inspirée le sujet de ce travail.

A MONSIEUR LE DOCTEUR P. BLUM
Officier de la Légion d'Honneur.

Chargé de Cours à la Faculté de Médecine
Directeur de l'Institut d'Hydrologie thérapeutique

A MES MAITRES DE LA FACULTÉ

DE MÉDECINE DE STRASBOURG

A MON JURY DE THÈSE

A MES CAMARADES DE LABORATOIRE

Introduction.

L'étude des liquides hétérogènes (suspensions, solutions colloïdales) a pris, dans la physico-chimie moderne, une importance considérable; elle a apporté des données dont les applications à la biologie et à la médecine sont de jour en jour plus nombreuses.

La mesure des dimensions des particules en suspension doit introduire dans le problème une notion essentielle, une *grandeur fondamentale* qui entrera dans tout calcul.

Mais, suivant la dimension même de ces particules, la mesure de leurs diamètres sera, ou ne sera pas, accessible à l'observation directe.

Dans ce dernier cas, on obtiendra les valeurs des dimensions, par extrapolation de formules expérimentales ou par application de formules théoriques.

Déjà, en 1913, VICTOR HENRI posait nettement le problème, dans le cas des solutions colloïdales, et indiquait diverses méthodes indirectes, avec leur territoire d'application: mesure de la viscosité d'une suspension, détermination du déplacement moyen d'une particule dans le mouvement brownien, vitesse de diffusion, vitesse de sédimentation, mesure de la densité d'une suspension à différentes hauteurs (d'après PERRIN, évaluation de l'intensité lumineuse rejetée latéralement par une suspension pour une intensité donnée de la radiation incidente (d'après LORD RAYLEIGH).

Ces méthodes ont souvent été utilisées depuis avec des approximations qui semblent insuffisantes aujourd'hui. Ainsi, on a généralement assimilé les particules à des sphères, dans les formules classiques. On pourrait adresser à l'ensemble des applications citées une critique formulée par M. VLÈS dans son cours: celle de combiner des équations obtenues dans des conditions de dimension très disparates. Il convient donc actuellement de réfléchir sur la valabilité, dans chaque cas particulier, des lois élémentaires que l'on emploie. Parmi les grandeurs citées ci-dessus, certaines, telles que le déplacement moyen dans le mouvement brownien, la quantité de lumière diffusée sur le côté dans la loi de LORD RAYLEIGH, sont fonction du *diamètre* des particules envisagées. D'autres, telles que la viscosité dans les formules classiques, sont fonction du *volume total* de substance dispersée.

Aussi le problème du recoupement des déterminations s'est posé. Si, en effet, l'une des quantités mesurées (la viscosité par exemple) était fonction du volume total de substance dispersée (de Nv; N étant le nombre des particules de v le volume de chacune d'elle) et si, par une autre détermination, on pouvait avoir le rayon d'une particule, en résolvant un système de deux équations à deux inconnues, on obtiendrait N et v.

Nous verrons ultérieurement le parti que BOUTARIC a tiré de ce recoupement, dans le cas du sérum sanguin, en utilisant les mesures de LECOMTE DU NOUY.

En 1921, VLÈS montrait dans son mémoire sur «Quelques propriétés optiques des suspensions biologiques et leur application à l'Opacimétrie bactérienne» (p. 253), l'intérêt qu'il y aurait à combiner les mesures de densité optique des suspensions biologiques (hématies en particulier) avec des déterminations réfractométriques, viscosimétriques ériométriques, pour définir entièrement les variables N et v.

Depuis plusieurs années, partant de cette suggestion, nous poursuivons des recherches relatives aux lois de variation de la viscosité et de l'opacité en fonction de la quantité de substance dispersée dans le cas des suspensions d'hématies. Ici les particules étudiées sont relativement grosses et les données du problème se montrent plus complexes que dans le cas des solutions colloïdales.

Les suspensions d'hématies réalisent un système particulaire de dimensions accessibles à la mesure directe, ce qui offre la possibilité d'avoir une base pour l'établissement des lois empiriques. D'autre part, nous avons affaire à une suspension biologique pour laquelle les questions de liaisons entre la particule et l'excipient sont de première importance. Les lois empiriques que l'on peut établir, donnent-elles des fonctions du nombre et des dimensions des éléments dispersés et *seulement* de ces variables? Ou bien, la substance de l'hématie entre-t-elle en ligne de compte?

Dans quelle mesure des déterminations de viscosité et d'absorption de la lumière nous permettront-elles d'avoir des notions sur le nombre d'éléments d'une suspension d'hématies et sur le volume particulaire? Pourrons-nous espérer suivre, par une telle méthode, des variations pathologiques ou expérimentales de ce nombre et de ce volume? Ou bien, en retournant le problème, si la viscosité et l'absorption de la lumière ne sont pas uniquement fonction du nombre N et du volume v des éléments, pourrons-nous, en déterminant directement N et v, avoir à par-

tir de nos mesures physiques, une notion sur la modification de la substance des hématies?

On peut donc espérer que l'étude de tels problèmes (qui semblent, au premier abord, ne devoir intéresser que la physique et la physico-chimie) pourra apporter une méthode de recherche applicable à l'étude des équilibres entre les hématies et le plasma. Or ces questions ont pris dans la médecine contemporaine une importance sur laquelle il n'est guère besoin d'insister.

Nos recherches ont été poursuivies à l'Institut de Physique biologique, sous la direction de M. le Professeur Vlès, qui nous a inspiré le sujet de ce travail. Qu'il nous soit permis de lui exprimer ici notre respectueuse reconnaissance.

I. Relation entre la viscosité des Suspensions d'hématies et le nombre d'éléments dispersés.

a) *Définition.*

La définition théorique de la viscosité d'un milieu trouble est difficile à donner. En effet, il entre dans son expression: 1°) un coefficient de frottement intérieur mutuel des couches liquides de l'excipient)frottement liquide-liquide bien défini par la loi de NEWTON) et 2°) un coefficient de frottement liquide-particule.

HESS, en analysant le phénomène, insiste sur le fait que, par suite de l'inflexion des couches liquides au voisinage des particules, il y a un espace mort en amont et en aval de la petite sphère en mouvement. Par conséquent, la masse de la phase transportée au sein du liquide est supérieure à la somme de celles des corpuscules.

LOEB distingue deux types de viscosités dont le premier, commun aux colloïdes et aux cristalloïdes n'est pas en relation avec les équilibres de DONNAN entre les particules et l'excipient; le second type de viscosité est dû «au gonflement de particules *submicroscopiques* solides qui se trouvent dans un liquide». Seul ce type de viscosité est particulier aux phénomènes colloïdaux et dépend des équilibres de DONNAN, il est d'un ordre de grandeur tel que le premier type de viscosité devient négligeable devant le second. On sait tout le parti que LOEB a tiré de ses recherches sur la viscosité des protides en fonction du pH et la mise en évidence d'un minimum de viscosité au point isoélectrique.

En ce qui touche la définition théorique de la viscosité d'un milieu trouble, nous réservons pour le moment toute interprétation.

Puisque la loi de POISEUILLE s'applique dans d'assez larges limites aux suspensions par nous étudiées (voir notre mémoire de 1924),nous pouvons, en opérant dans des conditions expérimentales convenables, définir la viscosité absolue d'une suspension à partir de cette loi.

b) *Technique utilisée. — Résultats obtenus sur le sang de Bœuf.*

Les suspensions que nous avons étudiées (hématies séparées du sérum, lavées plusieurs fois par centrifugation dans du Ringer sans sucre, puis dispersées dans cette même solution isotonique) représentent un milieu bien homogène et, en première approximation, on peut admettre que, en milieu isotonique, le volume particulaire ne varie pas sensiblement avec la concentration plus ou moins grande en hématies. Nos mesures ont été faites avec le viscomètres absolu de VLÈS (1).

Comme nous l'avons déjà dit dans notre mémoire de 1924, les viscosités absolues des excipients centrifugés peuvent présenter entre elles des écarts importants qui, suivant les conditions de préparation, de temps de séjour etc., peuvent atteindre 10%. Aussi, pour éliminer cette cause d'erreur, nous avons opéré comme suit:

Avec des hématies, plusieurs fois lavées par centrifugation, on prépare une suspension assez fortement concentrée *S;* puis on attend quelques heures (4 heures environ), on centrifuge une partie de *S,* on recueille l'excipient *E,* et on fera les suspensions à étudier par mélange, en parties convenables, de *S* et de *E.* Si l'on reprend par centrifugation, après l'expérience, l'excipient d'une des suspensions mesurées, on voit que sa viscosité est restée pratiquement identique à celle de *E.*

Exemple: Viscosité absolue de l'excipient
avant la mesure 0,00119
après " " 0,00120(6)

Par conséquent, les conditions de définition de nos milieux nous ont paru suffisantes.

Pour éliminer entièrement, d'une série à l'autre, les variations de viscosité de l'excipient, nous avons rapporté la viscosité η_i de chaque suspension à la viscosité η_{i0} de son excipient.

Nous donnons ci-dessous les résultats obtenus à partir d'une suspension d'hématies de Bœuf; nous avons pris comme variable le nom-

---

(1) Pour les détails relatifs à l'appareil et à la méthode voir:

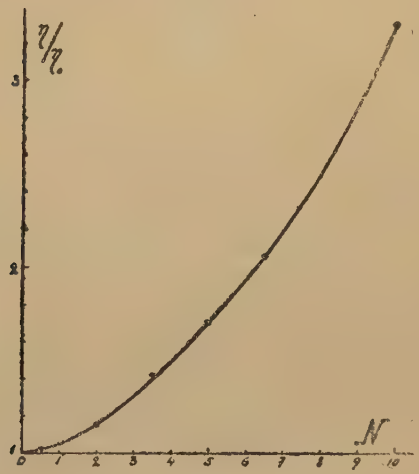
VLÈS F. — Cours de Physico-chimie des Pétroles, Vigot Paris 1928.

VLÈS F. — Précis de chimie physique à l'usage des étudiants en médecine, Vigot, Paris 1929.

ACHARD G. — Recherches viscosimétriques sur les suspensions d'hématies. Arch. Phys. biol., III 239-274, 1924.

bre d'éléments par m.m.c. de la suspension (pour nous conformer au mode de notation adopté en physiologie et en clinique). La numération directe est faite à la cellule de HAWKSLEY.

Sang de Bœuf. Viscosité relative à l'excipient en fonction du nombre d'hématies par m.m.c.: (fig. 1).



Nombre d'éléments (1)	η_1 / η_{10}
$0{,}15 \times 10^6$	1,01
0,50 "	1,02
1,00 "	1,05
1,60 "	1,13
2,00 "	1,16
2,65 "	1,26
3.00 "	1,34
3.50 "	1,42
5,00 "	1,70
6,50 "	2,07
10, "	3,30

Nous nous sommes demandé si nos résultats pouvaient être représentés d'une façon suffisamment approchée par les formules classiques.

A cet effet, nous croyons utile de rappeler l'état actuel de la question.

c) *Formules classiques donnant la viscosité d'un milieu trouble en fonction du volume de substance dispersée.*

De très nombreuses relations, les unes théoriques, les autres empiriques, ont été proposées pour exprimer la viscosité d'une suspension en fonction du volume de la phase dispersée.

A cause de l'importance des bases de raisonnement et des conditions de valabilité des lois, nous croyons utile de résumer les données des divers calculs théoriques et les limites dans lesquelles les résultats expérimentaux (obtenus sur différents matériels) ont vérifié les formules.

1) La première des relations théoriques est due à EINSTEIN (1906). Cet auteur se demande si, parallèlement aux résultats donnés par la

(1) Nous désignerons désormais par N le nombre d'éléments par m.m.c. $\times 10^{-6}$

théorie cinétique des gaz pour les dimensions moléculaires, les lois de l'hydrodynamique ne pourraient pas permettre de calculer le volume d'une molécule dissoute. Pour cela, il s'adresse d'une part à l'augmentation du coefficient de frottement en fonction du volume total dissous (et nous verrons les approximations qu'il fait), et, d'autre part à la vitesse de déplacement Δ dans la diffusion. Cela lui permet de poser et de résoudre un système de deux équations dont les inconnues sont *N* (nombre de molécules) et *r* (rayon de la molécule *supposée sphérique*).

EINSTEIN calcule la variation d'énergie cinétique apportée dans l'écoulement d'un liquide par l'introduction d'une sphère de petites dimensions (il applique les lois de l'hydrodynamique classique en supposant la sphère rigide, il néglige l'énergie cinétique de la sphère, admet que les composantes de vitesse des éléments de la surface de la sphère sont égales aux composantes homologues des particules adjacentes du fluide, et que à la séparation entre la sphère et le liquide le frottement n'a pas des coefficients infiniment petits).

L'énergie est $W = 2\,\delta^2\eta_0(V-\varphi)$; η_0 est la viscosité, V le volume du liquide, φ celui de la sphère $\delta^2 = A^2 + B^2 + C^2$; A B et C étant des constantes dans l'expression qui donne les composantes *u, v, w* de la vitesse en un point, en fonction de la position de ce point.

Le problème étant résolu pour le cas d'*une* sphère, EINSTEIN passe au cas d'un nombre fini de petites sphères solides (dispersées *sans ordre* dans le liquide, et telles que leur volume soit grand par rapport à celui des molécules du solvant), à l'aide d'une sommation et en introduisant le volume total dispersé, exprimé relativement au volume de la solution (soit φ).

Si la suspension était un liquide pur de viscosité η, on aurait $W_1 = 2\delta^2{}_1\eta$; en exprimant W_1 à partir des perturbations apportées par l'ensemble des petites sphères à l'énergie cinétique du solvant en mouvement, il vient $W_1 = 2\,\delta^2\,\eta_0\,(1+0{,}5\,\varphi)$; mais en calculant δ_1 par rapport à δ, on trouve $\delta^2{}_1 = \delta^2\,(1 - 2\,\varphi)^2$. En égalant les deux

(1) Notons que dans son premier mémoire (1905) Einstein avait donné la formule $\frac{\eta}{\eta_0} = 1 + \varphi$ dans son mémoire de 1911, après révision de son calcul, comme suite à une communication de Bancelin, il aboutit à $\frac{\eta}{\eta_0} = 1 + 2{,}5\,\varphi$. Signalons encore à ce sujet la correspondance entre EINSTEIN et KUNITZ relativement à l'approximation qui consiste à ne garder que les termes du 1er degré. (Voir la note de KUNITZ).

expressions de W_1 on obtient le rapport $\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{1 + 0{,}5\,\varphi}{(1 - 2\,\varphi)^2}$ (1)
Einstein ne garde que les deux premiers termes du quotient et donne la formule qui porte son nom $\frac{\eta}{\eta_0} = 1 + 2{,}5\,\varphi$. Cette expression montre que, en première approximation $\frac{\eta}{\eta_0} = f(\varphi)$ est une droite.

Mais, si l'on continuait le développement de l'expression $\frac{1+0{,}5\varphi}{(1-2\varphi)^2}$ verrait que, lorsque φ n'est pas très petit les termes autres que celui du premier degré ne sont pas négligaebles.

L'expression du 1er degré s'est montrée satisfaisante dans un certain nombre de déterminations, mais le coefficient expérimentalement obtenu n'a pas toujours été égal à 2,5. Nous parlerons tout à l'heure de ces mesures de vérification.

2) Hatschek est parti de considérations théoriques différentes de celles de Einstein. Il suppose, au sein d'un liquide homogène deux couches dont l'une est mobile par rapport à l'autre et exprime le travail $\mathcal{E} = \eta \frac{v^2}{l}$ par unité de temps. Si maintenant on suppose une sphère dans le liquide, en connaissant le gradient de vitesse (admettons la proportionnalité par rapport à la distance au plan immobile), on peut calculer la vitesse du centre de la sphère, et en appliquant la loi de Stockes calculer la force et le travail d'entrainement de cette sphère par unité de temps. Pour avoir le travail total, Hatschek multiplie simplement le travail élémentaire d'entrainement pour une sphère par le nombre de sphères contenues dans le volume considéré ; mais ceci ne nous paraît pas correct, car alors on ne tient plus compte du gradient de vitesse, d'aute part on n'a pas le droit de poser $\mathcal{E} = S_0^v f dv$, $\mathcal{E}$ étant le travail total par unité de temps, v étant la vitesse, et f la force d'entraînement car on n'est pas dans une phase continue.

Quoi qu'il en soit Hatschek achève son calcul en posant que le travail total d'entraînement est égal à la somme du travail d'entraînement de l'excipient et de l'ensemble des particules et arrive à l'expression finale du premier degré $\frac{\eta}{\eta} = 1 + \frac{9}{2}\varphi$ sans qu'il y ait de termes négligés.

Cette formule est de 1910. Hatschek remarque qu'elle ne doit s'appliquer que dans les limites de la loi de Stockes.

Elle est valable pour les suspensoïdes faiblement concentrés. Dans un mémoire postérieur (1911) HATSCHEK étudie le cas des émulsoïdes fortement concentrés. Il fait intervenir des notions d'équilibres de surface entre la substance émulsionnée et son excipient. Nous ne pouvons entrer ici dans le détail, disons seulement qu'HATSCHEK considère la substance émulsionnée comme débitée en petits dodécaëdres tangents, mais séparés par une mince couche d'excipient; si l'on suppose cette émulsion située entre deux plans, l'un fixe l'autre mobile, les dodécaëdres vont se déformer et tendre vers des prismes. En calculant le travail mis en jeu, *Hatschek* arive à la seconde des formules qui portent son nom:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{1}{1 - \sqrt[3]{\varphi}}$$ applicable pour $\varphi > 0{,}5$.

3) SMOLUCHOWSKI en 1916 fait remarquer que, si on amène un colloïde à la floculation, bien qu'il y ait le même volume de substance dispersée, on a une surface totale différente; et, par suite de petites quantités de solvant introduites entre les granules, on en arrive à considérer des particules de substance dispersée plus grandes que la somme des volumes constituant le floculat. Il propose de tenir compte des charges électriques et introduit dans sa formule la différence de potentiel entre l'intérieur et l'extérieur de la particule. Il modifie ainsi la formule d'Einstein:

$$\eta = \eta_0 \left[1 + \frac{5}{2}\varphi \left(1 + \frac{\sigma}{a^2 \mu} \left(\frac{K\,(\varphi\, i - \varphi\, a)}{2\pi} \right)^2 \right) \right]$$

formule dans laquelle K représente la constante diélectique de l'excipient $C(\varphi\, i - \varphi\, a)^2$ la différence de potentiel de la couche double, a le rayon de la particule, σ la résistance électrique spécifique.

SMOLUCHOWSKI insiste sur l'importance des sels sur la viscosité (action floculante et électromose).

Les idées très intéressantes exprimées dans ce mémoire mériteraient d'être reprises à la lumière de ce que nous savons aujourd'hui

4) ARRHÉNIUS en 1917 reprend une formule empirique qu'il avait déjà donnée en 1887. C'est une formule logarithmique: $\log \frac{\eta}{\eta_0} = A\varphi$ qui, d'après son auteur rend mieux compte des résultats de BANCELIN

(voir ci-dessous) que la formule d'EINSTEIN. Aver cette formule, ARRHÉNIUS calcule des coefficients d'hydratation de protéines d'après les mesures de H. CHICK (voir tableau p. 11).

5) HESS en 1920 considère les pressions P_0 et P provoquant par seconde des débits égaux de liquide et de suspension, si φ est le volume relatife de la substance dispersée il pose $\frac{P_0}{P} = \frac{1}{1-\varphi}$; mais le rapport des pressions est égal au rapport inverse des viscosités d'où $\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{1}{1-\varphi}$.
Comme nous l'avons dit au début de ce chapitre, HESS considère des espaces morts en amont et en aval des particules, ce qui l'amène à introduire un coefficient de correction *a* sur le volume et la formule devient $\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{1}{1-a\varphi}$, avec $a = 2{,}25$ aux faibles concentrations et $a = 1{,}15$ aux fortes concentrations,

6) KUNITZ en 1926 donne une formule empirique $\frac{1+0{,}5\varphi}{(1-\varphi)^4}$ différente de celle de EINSTEIN par la puissance 4 en dénominateur. Les deux premiers termes du développement de cette fromule empirique

$$\frac{\eta_0}{\eta} = 1 + 4{,}5\,\varphi + 12\,\varphi^2 + 25\,\varphi^3$$

redonnent la première formule de HATSCHEK.

En résumé, excepté l'équation d'ARRHÉNIUS qui est une exponentielle, toutes les formules expérimentales ou théoriques proposées sont des *polynomes* ainsi que le montre leur développement. D'ailleurs le développement en série de l'exponentielle exprime aussi un polynôme.

En somme nous avons deux types de formules cherchant à modifier le volume *a* en le multipliant par un coefficient (formule de HESS par exemple) ou en l'affectant d'un exposant (formule de HATSCHEK).

Tout ceci montre que le volume ne doit pas être la seule variable en cause.

---

(1) Expression amenée par l'étude de la répartition des vitesses, dans le tube de mesure: il divise le cylindre de liquide en mouvement en couches concentriques et admet que les différences de pression entre deux points situés sur un même rayon sont proportionnelles au nombre de couches entre ces deux points.

En général les auteurs qui ont cherché à vérifier les diverses formules énoncées plus haut n'ont pas comparé les courbes expérimentales aux courbes calculées. En effet, ils manquaient de précision sur le volume de la substance dispersée; aussi, pour tourner la difficulté, ont-ils calculé à partir de leurs mesures et des formules à étudier le volume occupé par 1 gr. de matière en suspension (ou toute autre grandeur proportionnelle à ce volume). Le critérium de valabilité de la loi sera, soit la constance du volume, soit une valeur acceptable du coefficient d'hydratation: (voir à ce sujet la discussion entre ARRHÉNIUS et HATSCHEK au sujet des coefficients d'hydratation tirés des mesures de Miss CHICK).

Nous laisserons de côté, pour le moment, toutes les questions très complexes relatives aux structures, aux limites entre viscosité et rigidité. (Voir à ce sujet l'ouvrage d'Hatschek et l'article du Duclaux).

De nombreuses mesures ont été faites et sur des colloïdes et sur des suspensions. Sans pouvoir apporter ici de documentation complète nous avons essayé de résumer dans un tableau les résultats obtenus.

SUBSTANCE DISPERSEE (ou dissoute)	Concentration maxima atteinte	Viscosité relative maxima atteinte	Technique	Formule	Auteur (1) et date
Sucres divers	20%	2,3		$\eta/\eta_0 = 1 + ac$	Enstein 19 Bancelin 19 Pulvermach 1920
Glycogène	40%	12	Ostwald	Hatschek Kunitz	Bottazzi d'Erico 190
Protéines Caséinog. Na Ovalbumine etc.	10% 10%	30 4	Ostwald	Hatschek Arrhénius Kunitz	H. Chick 1912-14
Caoutchouc ds benzol ds pentachloroethane	2% 2%	25 50	Ostwald modifié	Hatschek Kunitz	Kirchhof 1914
Soufre en susp. ds solut. de Na Cl. 10 à 100 $\mu\mu$	48%	5	Ostwald	Hatschek Kunitz	Sven Ode 1912
Gomme-gutte 0,30 à 2 μ	2,11% en vol.	1,05(2)	à partir de la loi de Stockes	$\eta/\eta_0 = 1+2{,}9\,\varphi$ Arrhénius	Bancelin 1911
Hématies (4) 5—8 μ	90% en vol. 50—80% en vol.	30 11	Ostwald Hess	Hatschek Hess	Trevan 1918 Bircher 1920

(1) Les indications données dans la colonne «Auteurs» sont relatives aux mémoires où l'on peut trouver les valeurs numériques des mesures. Les applications des formules ont été faites parfois par d'autres chercheurs, dans des publications postérieures. On trouvera à ce sujet tous les détails dans le mémoire d'Hatschek (Trans. Farad. Soc. 1913), dans celui d'Arrhénius (1917), puis de Kunitz (1926) et, enfin dans le dernier ouvrage d'Hatschek (1929). (Voir les références complètes dans notre bibliographie). Les auteurs cités ont étudié, pour la plupart, l'influence de la température, certains ont donné des formules. Nous ne les reproduisons pas dans ce mémoire, puisque nous limitons, pour le moment, notre étude à la viscosité en fonction de la concentration à température constante.

(2) Calculé, pour l'homogénéité du tableau, à partir des valeurs de viscosité absolues données par Bancelin.

d) *Discussion de leur valabilité pour les suspensions d'hématies.*

Dans le cas des mesures que nous avons faites le simple examen de notre courbe montre que la représentation par une droite n'est pas suffisante. Cherchons à voir si la formule d'HATSCHEK (la 2e) ou celle de HESS ne rendraient pas mieux compte des résultats. Une remarque s'impose tout d'abord pour la notation des concentrations: si v est le volume d'une particule et N le nombre total de ces particules on a: *volume total des particules* $= Nv$.

$$\varphi = \frac{\text{volume total des particules}}{\text{volume de la suspension}} = \frac{N\,v}{V_0}$$

Tant qu'on peut admettre $\frac{V}{V_0} = cte$

comme $\frac{V}{V_0} = Cte$ ou a $\varphi = KN$

Si $\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{1}{1 - a\varphi}$	ou $\frac{\eta}{\eta_0} \frac{1}{1 - \sqrt[3]{\varphi}}$
il vient $\frac{\eta_0}{\eta} = 1 - a\varphi$	$\frac{\eta_0}{\eta} = 1 - \sqrt[3]{\varphi}$
$\lg \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta}\right) = \lg a + \lg \varphi$	$\lg \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta}\right) = \frac{1}{3} \lg \varphi$

Suite des notes de la page 12:

(3) En combinnant les données de la viscosité avec celles de la vitesse de diffusion, Einstein a trouvé pour le nombre d'Avogadro N=4,15.10 à partir d'une mesure sur solution sucrée. Bancelin, sur gomme-goutte obtient N=7.10

(4) Nous avons exploré des limites de concentration beaucoup plus étroites pour avoir plus de précisions sur les données physiologiques. Nous avons, comme il a été déjà dit, obtenu la viscosité relative par rapport à l'excipient à l'aide de deux mesures de viscosité absolues. Les valeurs données par les auteurs cités sont déterminées au moyen de méthodes relatives et exprimées par rapport à l'eau. Ce sont sans doute les raisons des divergences constatées.

Donc, dans les deux cas $\lg\left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right) = f\ (\lg\ N)$

doit être une droite.

Mais si nous pointons, pour nos valeurs expérimentales, $\lg\left(1-\frac{\eta}{\eta_0}\right)$ en fonction de lg N la courbe (fig 2) ne peut guère être assimilée à une droite.

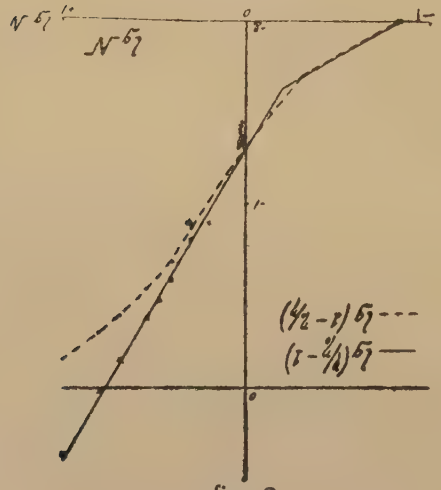


fig. 2

lg N	$\lg\left(1-\frac{\eta_0}{\eta}\right)$
—0,82	—2,
—0,31	—1,7
0,	—1,32
0,20	—0,94
0,30	—0,87
0,42	—0,69
0,47	—0,6
0,54	—0,53
0,69	—0,39
0,81	—0,29
1,	—0,16

Essais de formules empiriques

$$\lg\left(\frac{\eta}{\eta_0} - 1\right) = f\ (\lg\ N.)$$

$$\lg\left(1 - \frac{\eta_0}{\eta}\right) = f\ (\lg\ N.)$$

Pour faciliter les comparaisons des résultats, nous donnons dans le tableau et le graphique ci-joints, les valeurs que l'on obtiendrait en calculant la viscosité, à partir de nos données, au moyen des diverses formules (1).

---

(1) Nous avons calculé φ à partir du nombre d'hématies et du volume d'une hématie. Nous verrons plus loin (Ch. II) les erreurs introduites de ce fait; mais nous devons remarquer que «l'allure» des courbes calculées ne coïncide pas avec «l'allure» de notre courbe expérimentale. C'est donc bien une portion de *formules* et non une question d'approximation sur la valeur du volume.

Valeurs expérimentales		Valeurs données par les formules de			
N	$\frac{\eta}{\eta_0}$	Einstein	Hess	Kunitz	Arrhénius
0,15	1,01	1,01	1,01	1,02	1,01
1,00	1,05	1,07	1,03	1,12	1,07
2,00	1,16	1,16	1,07	1,33	1,16
3,00	1,34	1,27	1,26	1,53	1,24
5,00	1,70	1,48	1,51	2,05	1,44
6,5	2,07	1,69	1,79	2,60	1,62
10,	3,30	3,07	3,06	4,79	2,10

fig. 3

Résultats données par l'application de diverses formules pour la viscosité des suspensions d'hématies de Bœuf. Valeurs calculées d'après les relations de: 1 EINSTEIN, 2 ARRHÉNIUS, 3 HESS, 4 KUNITZ, 5 d'après la formule empirique de la page 16.

Nous voyons que, si plusieurs des formules sont susceptibles de rendre compte de nos résultats pour les faibles concentrations, les valeurs qu'elles nous donnent aux fortes concentrations diffèrent nettement des valeurs expérimentales. Les nombres trouvés par la formule de KUNITZ sont tous supérieurs à nos données. D'ailleurs KUNITZ ne donne sa formule que pour les concentrations élevées.

e) *Formule empirique proposée.*

Nous nous sommes proposé ensuite de rendre compte de nos résultats expérimentaux par une formule empirique du type $\frac{\eta}{\eta_0} = 1 + aN^b$

Pour qu'une telle formule puisse convenir, il faut avoir

$\lg\left(\frac{\eta}{\eta_0} - 1\right) = \lg a + b \lg N$; donc $\lg\left(\frac{\eta}{\eta} - 1\right) = f\ (\lg\ N)$ doit être une droite.

C'est ce que montre la courbe (voir fig 2) :

N	Valeurs experimentals de $\frac{\eta}{\eta_0}$	Valeurs calculées avec notre formule	lg N	$\lg\left(\frac{\eta}{\eta_0} - 1\right)$
0,15	1,01	1,00(2)	—0,82	—2,
0,50	1,02	1,01	—0,31	—1,70
1,00	1,05	1,05	0,00	—1,30
1,60	1,13	1,10	0,20	—0,89
2,0	1,16	1,15	0,30	—0,80
2,65	1,26	1,24	0,42	—0,59
3,00	1,34	1,30	0,47	—0,47
3,50	1,42	1,40	0,54	—0,38
5,00	1,70	1,71	0,69	—0,15
6,50	2,07	2,11	0,81	+0,02
10,00	3,30	3,30	1,00	+0,36

Valeur des coefficients $a = 0{,}0486$

$b = 1{,}67$

Pour les faibles concentrations, l'accord n'est qu'apparent (voir fig. 2). D'autre part, quand on fait *beaucoup* de mesures dans les conditions où le viscosimètre de VLÈS peut donner toute sa précision, on n'a pas au début une courbe à allure régulière. Cela tient, ainsi que nous le préciserons dans un travail ultérieur, aux échanges entre les hématies et leur excipient qui deviennent importants vis-à-vis des variations de viscosité.

Ajoutons que notre formule empirique introduit, au point de vue physique, une hypothèse toute simple. L'expression $\frac{\eta}{\eta_0} - 1 = a\,N^b$ peut être considérée comme l'intégrale de l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = b\frac{d\,N}{N} \quad \text{avec } \alpha = \frac{\eta}{\eta_0} - 1$$

Donc la variation de viscosité relative rapportée à la viscosité relative serait proportionnelle à la variation de nombre rapportée au nombre.

Des mesures ultérieures expliciteront les coefficients a et b, en introduisant des données relatives aux dimensions des particules, (données que nous nous proposons d'établir directement sur du matériel frais).

II. Relation entre l'opacité et le nombre d'hématies en suspension.

a) *Étude bibliographique des recherches effectuées sur l'absorption de la lumière par les milieux troubles : Formules théoriques et empiriques.*

De nombreuses recherches ont été effectuées sur l'absorption de la lumière par les milieux troubles. Les unes (celles de LORD RAYLEIGH, BOUTARIC, VLÈS, TEORELL) ont porté sur l'absorption, par un milieu trouble défini, de radiations de longueur d'onde variable (TEORELL), les autres (celles de VLÉS, CHÈNEVEAU et AUDUBERT, JACOBS) sur l'absorption d'une radiation de longueur d'onde donnée en fonction de la concentration du milieu trouble considéré.

Les milieux troubles soumis à expérience ont été très variables : granules de mstic sélectionnés, de diamètres échelonnés entre 0,1 et 10 μ (*Chèneveau* et *Audubert*), suspensions biologiques de provenance très diverses : bactéries, spores, hématies etc. et de diamètre variant entre 2 et 890 μ (VLÈS), hématies (JACOBS), gélatine, hydrate de fer colloïdal (TEORELL), etc..

Les mesures ont été faites, soit par voie spectrophotométrique, soit par voie opacimétrique (voir le mémoire de Vlès), soit par détermination de l'épaisseur limite de milieu à travers laquelle on voit un filament incandescent. Cette dernière méthode n'a pas la valeur des précédentes.

Des lois, théoriques et expérimentales ont été données et on peut les résumer ainsi, d'après Vlès :

I. *Variation de l'opacité avec la concentration.*
α) grosses particules :

A) *Lois hyperboliques*

$$\frac{I}{I_0} = AN^{-1} + B$$

$$\frac{I}{I_0} = C_v^{-1} + D$$

reliant, pour une longueur d'onde donnée, l'opacité au nombre ou au volume des particules, VLÈS, rendant compte des phénomènes sur une très large échelle (entre 2 μ et 890 μ) (1921).

Jacobs (1930) aboutit à une loi de forme analogue.

B) *Lois exponentielles.*

$$\frac{I}{I_0} = e^{-(Knv)^{\frac{1}{u}}}$$

(Vlès) : même échelle de diamètre que précédemment (1).

$$1 - \frac{I}{I_0} = e^{-\frac{B}{M^{\beta}}}$$

(Chèneveau et Audubert) : Formule dans laquelle *M* représente la masse totale des éléments B et β des constantes ; utilisée par ses auteurs pour des milieux troubles homogènes (suspensions de mastic déjà citées de diamètre variant entre 0,1 et 11 μ) et aussi pour des milieux troubles hétérogènes : précipités, émulsions de mastic, gomme-goutte, huile etc. —

β) *Petites particules.*

Ces lois sont établies pour des suspensions à particules relativement grosses. Ajoutons que, pour des colloïdes finement dispersés, Teorell a trouvé que les lois de Beer et de Lambert s'appliquaient. Cela revient à égaler à 1 les exposants des formules précédentes, (d'accord avec les résultats donnés antérieurement par Garnett pour les colloïdes métalliques).

Dans son mémoire de 1921 Vlès donne le tableau suivant (p. *260*) qui montre que les valeurs le l'exposant diminuent avec la grosseur des particules en suspensions.

---

(1) Vlès établit mathématiquement que, si une fonction hyperbolique rend compte d'un phénomène entre deux limites, on peut calculer les coefficients d'une exponentielle de forme $cAx\beta$ que rendra aussi compte du phénomène,

Phénomène	Part cule	Ordre de grandeur du diamètre en μ	$\frac{I}{I_0} = exp f\left(\frac{1}{\lambda^m}\right)$ ordre de grandeur de m =	$\frac{I}{I_0} = exp f(D^z)$ Z =
Bleu du ciel (théorie de Lord Rayleigh) . . .	molécules gazeuses	0,0001	4	2
Solutions colloïdales . .	granules colloïdaux	0,001 à 0,3	4	2
Colloïdes métalliques (Garnett)			1	1
Diffusion atmosphérique (Boutaric)	grosions et gouttelettes d'eau	0,01	$\lessapprox 4$	2
Précipités (Boutaric, Compan, etc.			3 à 2	
Emulsions bactériennes . .	bactéries	2	1,5 à 0,5	0,3 à 0,6
Emulsions sanguines . .	hématies	7		
Poudre de lycopode . .	spores	30	→ 0,8	
Œufs de merlan . . .	œufs	890	→ 0 (grands λ)	0,2 à 0,8
(Schéma des grosses billes)			→ 0	< 1

Si l'on fait entrer dans l'expression de $\frac{I}{I_0}$ le produit $Nv = V$ (quantité de substance), ce qui paraît justifié pour les suspensions à grosses particules, on voit qu'on ne peut pas former de système d'équations par combinaison avec les formules clasiques de viscosité. Dans les deux cas, en effet, ce qui est la variable indépendante est $V = Nv$, donc on ne peut tirer N et v de la résolution d'un système d'équations.

Boutaric, dans le cas des colloïdes du sérum sanguin, pose que la densité optique est proportionnelle au nombre d'éléments et au carré du volume élémentaire; alors, pour ces suspensions à *particules très petites* ou peut résoudre un système à deux inconnues, en recoupant par une détermination de viscosité. L'auteur, en appliquant cette méthode de calcul à l'étude des mesures de Lecomte du Nouy sur le sérum chauffé, montre que le nombre de particules ne varie pas pendant l'échauffement, mais que les particules gonflent par fixation d'eau.

c) Vlès propose enfin une troisième loi qui fait entrer en ligne de compte l'absorption propre du milieu interparticulaire et celle de la substance dispersée.

$$\omega = (\omega_0 - \omega_i)\, e^{Aq} + \omega_i$$

q étant la quantité de substance dispersée, ω_0 la transmission de l'excipient, ω^i celle de la substance constituant les particules, et ω celle de la susepnsion.

II. *Variation de l'opacité avec la longueur d'onde.*

Loi du type $\frac{I}{I_0} = e^{f\left(\frac{1}{\lambda^m}\right)}$ (formule de Lord Rayleigh généralisée par Boutaric.

Le tableau précédent emprunté à Vlès (p. 20) montre que l'exposant de la longueur d'onde décroit avec le diamètre des particules.

Teorell a dit récemment que l'exposant *4* de la formule classique de Lord Rayleigh ne lui suffisait pas pour représenter l'échelle des colloïdes étudiée par lui et qu'il doit, lorsque les granules en suspension ne sont pas infiniment petits, prendre des valeurs inférieures à *4*.

L'examen des formules et des interprétations données par les divers auteurs, montre clairement qu'au-dessus d'un diamètre particulaire de 0,1 μ environ les lois de Lord Rayleigh et de Beer ne rendent plus compte des phénomènes; pour interpréter les résultats expérimentaux, il faut affecter la longueur d'onde et la quantité de substance dispersée d'exposants variant avec l'ordre de grandeur des particules. Les lois de Lord Rayleigh et de Beer où l'exposant est égal à 1 représentant un début de série du côté des petits diamètres.

b) *Nos recherches sur les suspensions d'hématies de Bœuf.*

Nous avons déterminé l'opacité des suspensions qui nous avaient servi pour les mesures de viscosité. (Suspensions d'hématies de Bœuf).

Nous avons opéré avec le spectrophomètre Glan, sous une épaisseur de 0,018 cm, sur λ 620 m μ.

$N^{(1)}$	$Colg \frac{I}{I_0}$	$\frac{I}{I_0}$
0,150	0,75	0,177
0,500	1,00	0,100
2,00	1,46	0,034(6)
2,50	1,56	0,027(5)
5,00	1,80	0,015(8)
6,50	1,90	0,012(6)
10,00	2,04	0,0091

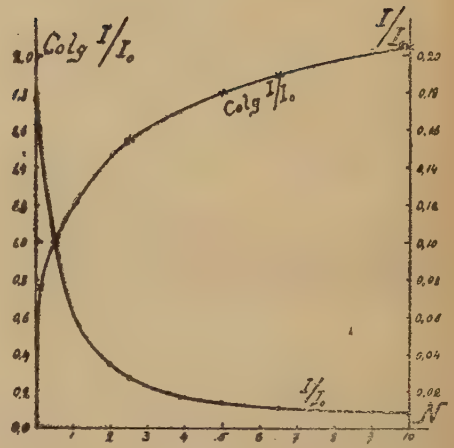


fig. 4

$\frac{I}{I_0} = f(N)$ et colg. $\frac{I}{I_0} = f(N)$

(pour les suspensions d'hématies de Bœuf sous 0,018 cm d'épaisseu

c) *Application des formules du paragraphe a)*

Nous avons essayé d'appliquer les forumles théoriques précédentes. La loi du type hyperbolique donnée par *Vlès* (d'ailleurs pour les épaisseurs plus grandes), s'applique bien aux fortes concentrations: $2<N<10$; mais elle ne rend plus compte des faits pour $N<2$, ainsi que le montre la courbe ci-jointe: (*fig. 5*): La fonction $\frac{I}{I_0}=f\left(\frac{I}{N}\right)$ est une droite pour $2<N<10$ ou $0,5>\frac{I}{N}>0,1$; au-dessus de cette valeur la droite ne suffit plus. Le calcul des coefficients amène à l'équation suivante $\frac{I}{I_0}=0,0637\times\frac{1}{N}+0,0028$.

(1) Voir la définition de *N* p. 6.

$\frac{I}{N}$	$\frac{I}{I_0}$ mesurée	$\frac{I}{I_0}$ calculé (fonct. hyperbolique)
6,6	0,177	
2,0	0,100	
0,5	0,0346	0,0347
0,4	0,0275	0,0258
0,2	0,0158	0,0152
0,1(5)	0,0126	0,0124
0,1(0)	0,0091	0,0091

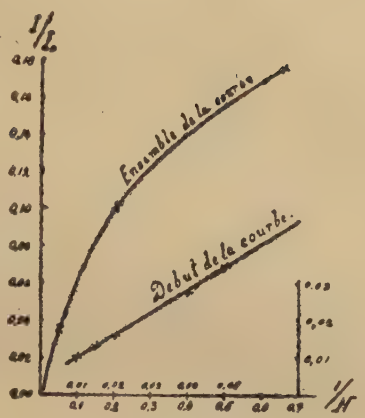


fig. 5

Essai de formule empirique.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{A}{N} + B$$

2) La formule du type exponentiel de VLÈS (donnée pour une épaisseur de 1 cm) peut rendre compte du phénomène à condition de considérer deux lois empiriques, l'une pour les faibles concentrations, l'autre pour les fortes :

$$\text{colg}\ \frac{I}{I_0} = 1{,}22\ N^{\,0{,}273} \quad \text{pour } 0 < N < 2{,}88$$

$$\text{colg}\ \frac{I}{I_0} = 1{,}34\ N^{\,0{,}185} \quad \text{pour } 2{,}88 < N < 10$$

Le tableau et le graphique suivants donnent *lg colg* $\frac{I}{I_0}$ en fonction de (*lg N*) et on voit nettement qu'une seule droite *lg colg* $\frac{I}{I_0} = f(lgN)$ ne peut pas rendre compte de l'ensemble des résultats (fig. 6).

lg N	lg colg $\frac{I}{I_0}$
—0,82	—0,130
—0,31	0
+0,30	0,164
+0,39	0,193
+0,69	0,255
+0,81	0,278
+1,	0,309

Si l'on applique la deuxième forme exponentielle donnée par VLÈS on voit que, en calculant $\omega = f(\omega)$ avec $\left(\omega = \frac{I}{I_0}\right)$ on n'obtient pas une seule droite, mais deux droites comme précédemment. Leur intersection correspond à $N = 1,3$ (*fig. 7*).

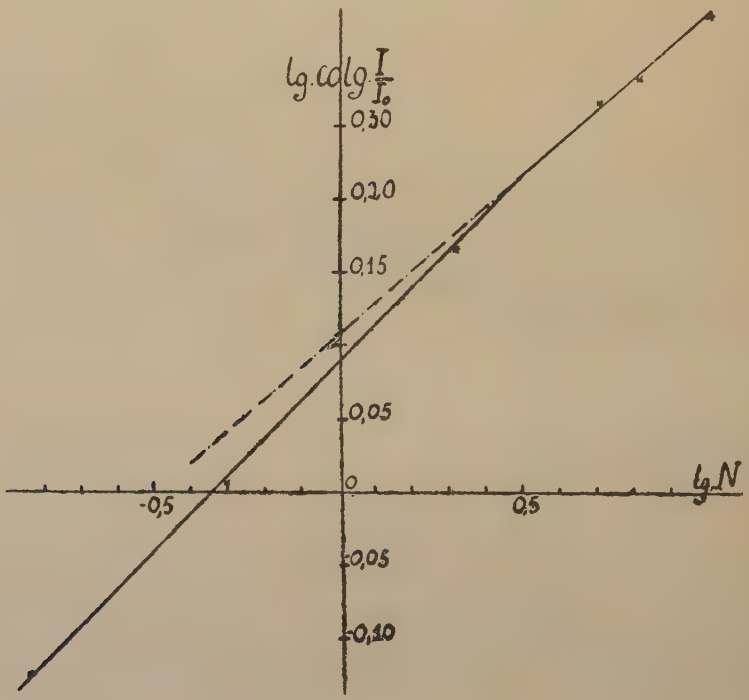


fig. 6
Essai de la formule empirique
$\frac{I}{I_0} = KN^p$

$\frac{I}{I_0}$	$\frac{\Delta \frac{I}{I_0}}{\Delta N}$
0,138	0,18
0,100	0,12
0,080	0,08
0,070	0,07
0,052	0,032
0,038	0,020
0,025	0,012
0,014	0,0064

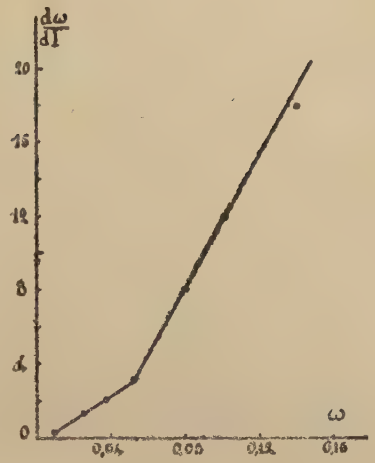


fig. 7

Essai de formule empirique

$$\frac{d\omega}{dI} = C\omega + D$$

Si on pose, pour chacune des droites

l'équation $\frac{\Delta \omega}{\Delta \varphi} = A\omega + B$

avec $\omega = \frac{I}{I_0}$

on trouve aux faibles concentration pour $N < 1,3$

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta \varphi} = 1,77\ \omega - 0,06$$

et, pour $N > 1,3$

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta \varphi} = 0,72\ \omega - 0,005$$

Or Vlès a montré (voir mémoire déjà cité p. 262), que $-\frac{B}{A} = \omega_i$ est la valeur dont se rapproche la transmission limite du système où le véhicule a disparu devant l'accumulation des particules, ω_i représente donc une fonction directe de la transmission de la substance pure de la particule. On voit tout de suite que l'on aurait des valeurs très différentes pour la transmission de cette substance dans le cas des suspensions concentrées et dans celui des suspensions diluées.

Sur la longueur d'onde choisie, λ 620 on peut considérer que $\omega_0 = 1$.

$\frac{B}{A} = 0{,}0069$ en suspension concentrée

$\frac{B}{A} = 0{,}033$ " " diluée

Ces deux valeurs du rapport $\omega_i = -\frac{B}{A}$ sont du même ordre de grandeur que celle donnée par VLÈS $\omega_i = 0{,}025$ (p. *263* du mémoire déjà cité). On peut se demander quelle serait, dans le cas de nos suspensions d'hématies, la part de transmission due à l'hémoglobine. D'après nos déterminations, une hématie de Bœuf contient 11,4 10^{-12} gr O^2Hb, dans le cas de notre suspension la plus concentrée ($N = 10 \times 10^9$ par cmc) nous aurions une quantité de O^2Hb de 114×10^{-3}. En calculant la transmission de cette masse d'O^2Hb sous une épaisseur de 0,018 avec la loi de BEER-LAMBERT ($K = 28$ sur λ 620 d'après VLÈS (1) on obtient $\frac{I}{I_0} = 0{,}877$. On voit que, sur cette longueur d'onde : λ 620, l'absorption due à l'hémoglobine, même dans le cas de notre suspension la plus concentrée demeure faible à côté de celle de la suspension elle-même. Valeurs de la transmission :

$\frac{I}{I_0} = 0{,}0091$ pour la suspension,

$\frac{I}{I_0} = 0{,}877$ pour l'oxyhémoglobine seule.

* *
*

Donc, que l'on s'adresse à l'étude de la viscosité ou à celle de l'opacité en fonction du nombre d'éléments en suspension, on ne peut, au moyen d'une seule des formules empiriques essayées, rendre compte de l'ensemble de nos résultats expérimentaux. D'ailleurs les limites d'application ne sont pas les mêmes pour les diverses formules utilisées.

Nous nous sommes demandé s'il n'y avait pas un changement du volume particulaire avec la concentration.

Si l'on part des lois empiriques établies pour les suspensions concentrées, qu'on les extrapole aux faibles concentrations, et qu'on calcule la variation du volume élémentaire admisible pour que la loi continue à s'appliquer, on peut se demander si l'ordre de grandeur de cette variation est le même pour la viscosité et pour l'opacité.

---

(1) Vlès. — Arch. Phys. biol. I pp. 1-19, 1921. Notes sur les constantes optiques des hémoglobines.

En comparant les droites logarithmiques des fig. 2 et 6 relatives à la viscosité et à l'opacité, on voit tout de suite que, pour que la droite logarithmique des viscosités aux fortes concentrations rende aussi compte des valeurs obtenues aux faibles concentrations, il faudrait admettre des nombres d'hématies *plus grands* que les nombres réels, donc supposer que les hématies ont gonflé, même en solution isotonique.

Si l'on prend comme unité le volume d'une hématie pour une concentration supérieure à N = 2,88,

pour N = 0,50, on aurait un gonflement de 1,14.

pour N = 0,150 " " " " " 2,50.

Au contraire, pour rendre compte, dans le cas des mesures d'opacité, des résultats obtenus à faible concentration par extrapoliation de la droite logarithmique des fortes concentrations, il faudrait admettre un nombre plus petit que le nombre réel, donc supposer que les hématies ont diminué de volume.

Pour N = 0,50 on aurait un gonflement de –0,63

Pour N = 0,150 " " " " " –0,52

La contradiction à laquelle nous arrivons montre l'insuffisance de notre hypothèse, relative à l'augmentation du volume en suspension peu concentrée, pour rendre compte de l'ensemble des écarts obtenus par l'application des lois empiriques.

III. Relation entre l'opacité d'une suspension d'hématies et l'épaisseur de substance traversée par la lumière.

a) *Intérêt du problème.*

Il y a donc lieu de voir de près les conditions physiques des mesures effectuées.

Réservant pour le moment le problème de la viscosité des suspensions d'hématies à très faible concentration, nous allons donner ici les résultats de notre étude relative à l'opacité de ces suspensions.

Pour affaiblir l'absorption de la lumière par un milieu trouble donné, deux possibilités s'offrent à nous: ou diminuer la concentration, ou diminuer l'épaisseur (parallèlement à ce qu'on à l'habitude de faire pour les solutions dans les cas d'application des lois de BEER et de LAMBERT). On voit tout de suite l'intérêt du problème: si nous craignons un changement du volume particulaire en fonction de la concentration en hématies, un tel phénomène n'interviendra pas lorsque nous agirons sur l'épaisseur de la suspension au lieu d'agir sur sa concentration.

b) *Technique.*

Nous avons fait, sur du matériel frais, (suspensions d'hématies de six espèces animales: (*Bœuf, Porc, Chien, Lapin, Mouton, Poule*) des mesures d'opacité en fonction de la concentration et de l'épaisseur. Les déterminations, faites à l'aide du spectrophotomètre Glan ont porté comme précédemment sur λ 620.

Expérimentation: Nous avons expérimenté comme suit:

α) *Cuve.*

Avec une cuve de 1 cm d'épaisseur, où on introduirait des blocs en verre, il est théoriquement possible de réaliser une épaisseur donnée. Mais une difficulté pratique se présente: quand on met dans la cuve des blocs de verre assez épais, des phénomènes de capillarité se produisent, des ménisques se forment et leur hauteur peut ne

pas être la même de chaque côté du bloc. Il en résulte des imprécisions sur la surface du niveau NN' où doit être faite la délimitation des deux faisceaux lumineux à étudier. Aussi fallait-il tourner la difficulté : sur le conseil de M. VLÈS, nous avons construit une cuve dont la partie inférieure est en verre ; sur cette base de verre on pose les blocs qui doivent servir à réduire l'épaisseur, puis on remplit la cuve avec la suspension à étudier. Le niveau NN' est net par conséquent.

Dans ces conditions, la lecture que nous faisons au goniomètre nous donne un angle α correspondant à $\frac{I_0}{I}$, en appelant I_0 l'intensité du rayon qui n'a traversé que le verre.

Pour avoir $\frac{I}{I_0}$ il faudra donc prendre le complément de l'angle α

β) *Corrections.*

Nous avons dû introduire deux sortes de corrections :

1) L'une d'elles tenant à la cuve et aux lames employées ;

2) L'autre tenant à l'absorption par le liquide interparticulaire.

1) Nous avons déterminé le «zéro» en remplissant la cuve d'eau afin d'éliminer du calcul l'absorption de la cuve (verre, baume de Canada ayant collé la cuve). La valeur de l'absorption ainsi trouvée sera retranchée de toutes les valeurs de *colg* déterminées pour les suspensions.

Puis, en introduisant chacune des lames de verre dans la cuve, nous avons mesuré le «zéro» correspondant. Les modifications du zéro par les lames de verre ont été très faibles.

Pour vérifier notre appareillage et ses corrections, nous avons appliqué la loi de LAMBERT, à une solution qui suit cette loi : Nous avons pris l'oxyhémoglobine sur λ 578. Et, pour être dans les conditions de nos expériences au point de vue longueur d'onde, nous avons fait une autre série de mesures avec le vert lumière : le sommet de la bande d'absorption de ce colorant est sur λ 640 et la fin de bande dépasse, pour des concentrations convenables, λ 620. Les résultats se sont montrés satisfaisants.

2) Pour évaluer la correction à introduire du fait de l'absorption du liquide interparticulaire, nous avons centrifugé les suspensions employées et mesuré spectrophotométriquement l'absorption du liquide de centrifugation.

Cette absorption varie avec la concentration en hématies des suspensions utilisées.

Elle est à peu près insensible sous 1 cm d'épaisseur pour les suspensions faiblement concentrées (environ jusqu'à N = 5) et fraiches. Pour des concentrations supérieures à celle-ci, elle devient importante.

Nous avons cherché la loi d'absorption de ce liquide interparticulaire (loi d'absorption en fonction de l'épaisseur) et trouvé que l'on pouvait en première approximation appliquer la loi de LAMBERT.

Donnons un exemple. Sang de mouton, même concentration que le sang total; mais suspension faite avec du sérum physiologique; liquide de centrifugation nettement rouge.

Epaisseur	Colg $\frac{I_0}{I}$ sur λ 620
1 cm	0,34
0,73	0,26
0,34	0,14
0,20	0,08

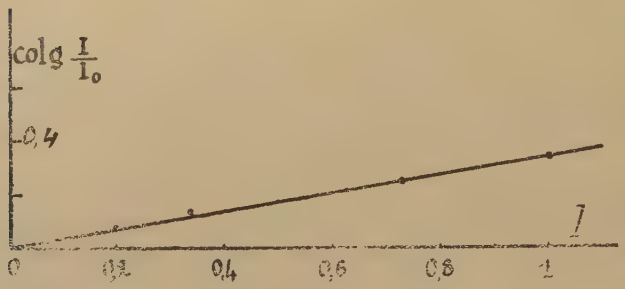


fig. 8

$$\text{Colg } \frac{I}{I_0} = f\,(l)\ \text{(Excipent)}$$

Par conséquent, on est en droit d'opérer ainsi:

Recueillir les excipients des suspensions fortement concentrées, prendre colg $\frac{I}{I_0}$ sous 1 cm et calculer, à partir de cette mesure et en appliquant la loi de LAMBERT, la correction à effectuer pour chaque épaisseur.

c) *Résultats obtenus.*

Nous donnons, dans les tableaux suivants, les valeurs de colg $\frac{I}{I_0} = f\,(l)$ pour des suspensions diversement concentrées, obtenues à partir de sang de diverses espèces animales.

Suspensions d'hématies de Chien.

Epaisseur l en cm ↓	0,034	0,152	0,218	0,412	8,24			→ N = nombre d'hématies par m. m. c × 10^{-6}
1,00	1,32	2,12	2,25	2,66				
0,73	1,16	1,84	2,05	2,46				
0,60	1,04	1,73	1,92	2,35				
0,34	0,74	1,37	1,62	2,05				
0,20	0.55	1,15	×	1,76				
0,09	0,30	0,70	1,0	1,42				
0,06	0,17		0,80	1,20	2,66	2,58 avec c = 5,6·		
0,04	0,09		0,63	0,97	2,38	2,40 avec c = 4,2		
0,028			0,50	0,81	2,20			
0,018			0,34	0,61	2,05			

Suspensions d'hématies de Bœuf.

Epaisseur en cm ↓	0,027	0,041	0,047	0,084	0,136	0,155	2,50	10,0	→ N = nombre d'hématies au m. m. c × 10^{-6}
1,00	1,06	1,41	1,51	1,90	2,21	2,28			
0,73	0,91	1,31	1,39	1,73	2,05	2,13			
0,61	0,84	1,22	1,30	1,63	1,96	2,06			
0,34	0,56	0,93	1,03	1,34	1,70	1,76			
0,13		0,48	0,68	0,92	1,24	1,33			
0,09		0,28	0,50	0,73	1,10	1,13	2,26	3,24	
0,052							2,10	2,73	
0,040							1,95	2,44	
0,031							1,84	2,38	
0,018							1,63	2,06	

Suspensions d'hématies de Porc.

paisseur l en cm	0,031	0,116	0,201	0,372	0,465	0,930	1,86	3,72	7,44	N = nom d'hématies m. m. c×
,00	1,32	2,02	2,43	2,65						
,73	1,17	1,87	2,21	2,48						
,60	1,07	1,77	2,11							
,34	0,77	1,43	1,72	2,07						
,20	0,61	1,27	1,54	1,77						
,09	0,30	0,77		1,46						
,06(8)					1,72					
,06(0)	0,22	0,75	1,01	1,37						
,05(5)						0,267	0,332	0,354	0,369	
,04(6)			0,97	1,20	1,60					
,03(8)						0,243				
,03(2)			0,79	0,99			1,92	2,10	2,22	
,02(2)				0,75	1,30	1,54				
,01(7)					1,12		1,67			
,01(4)								1,86	1,93	

Suspensions d'hématies de Lapin.

Épaisseur l en cm	0,036	0,055	0,198	0,396	1,584	4,765	7,920	N = nombre d'hématies par m. m. c. × 10 -6
1,00	1,20	1,37	1,88	2,05				
0,73	1,03	1,20	1,74	1,85				
0,60	0,90	1,08	1,64	1,78				
0,34	0,62		1,35	1,54				
0,20	0,40	0,61	1,12	1,34				
0,09	0,15	0,40	0,76		1,58			
0,07(0)				1,00	1,48	1,75		
0,06(8)							2,24	
0,05(6)		0,19	0,55				2,10	
0,05(0)				0,85		1,62		
0,03(7)			0,39		1,20			
0,03(2)				0,64		1,45	1,97	
0,01(7)				0,44				
0,01(4)					0,73	1,08	1,70	

Suspensions d'hématies de Mouton

Epaisseur en cm ↓	0,040	0,293	0,420	0,800	8,00	15,00	← N = nombre d'hématies par m. m. c × 10^{-6}
1,00	0,95	1,98	2,20	2,50			
0,73	0,80	1,81	2,02	2,22			
0,60	0,71	1,68	1,88	2,00			
0,34	0,48	1,34	1,60	1,70			
0,20	0,39	1,09	1,22	1,47			
0,09	0,22	0,78	0,96	1,10			
0,07		0,64	0,83	1,00			
0,055		0,56	0,74	0,94	2,09	2,35	
0,037			0,63	0,78	1,87	2,21	
0,017				0,62	1,63	1,91	

Suspensions d'hématies de Poule

Epaisseurs en cm ↓	0,023	0,126	0,230	4,60	← N = nombre d'hématies par m m. c. × 10^{-6}
1		2,06	2,48		
0,73	0,80		2,24		
0,60	0,71		2,05		
0,34	0,44	1,32	1,61		
0,20	0,27		1,38		
0,09	0,11	0,68	1,00		
0,067				2,11	
0,055				2,00	
0,045				1,86	
0,037		0,35	0,64	1,74	
0,017				1,26	

Ne pouvant reproduire l'ensemble des figures correspondant à nos tableaux, nous avons fait le choix suivant:

fig 9 ensemble des valeurs de $\text{colg}\frac{I}{I_0} = f(l)$ obtenues à partir d'hématies de Bœuf.

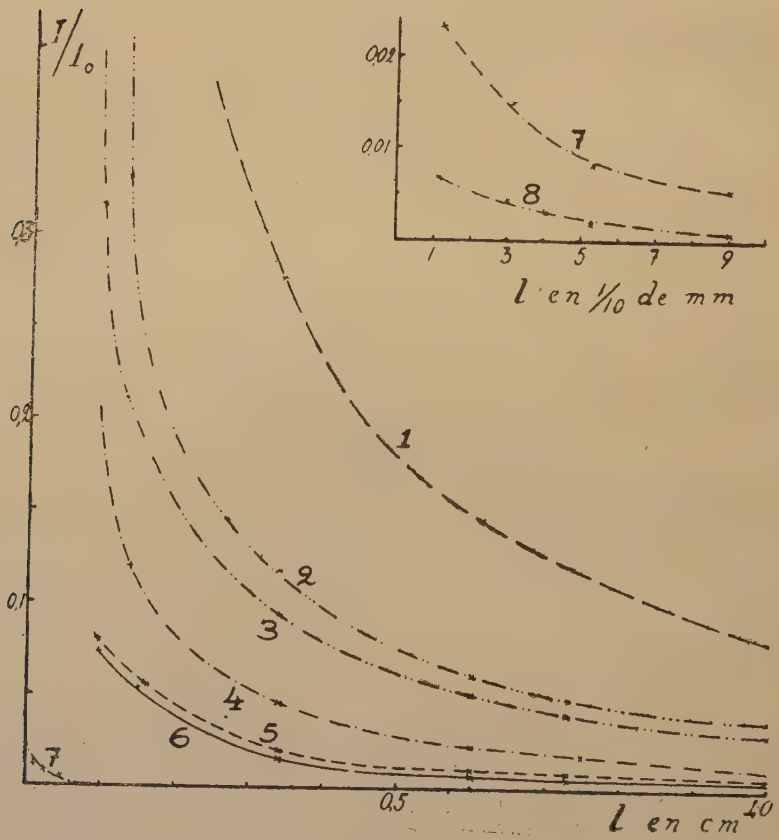
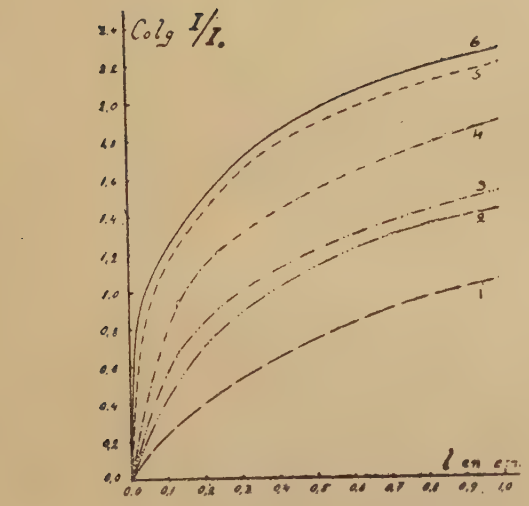


fig. 9

1 N=0,027	*5* N=0,136
2 N=0,041	*6* N=0,155
3 N=0,047	*7* N=2,50
4 N=0,084	*8* N=10,0



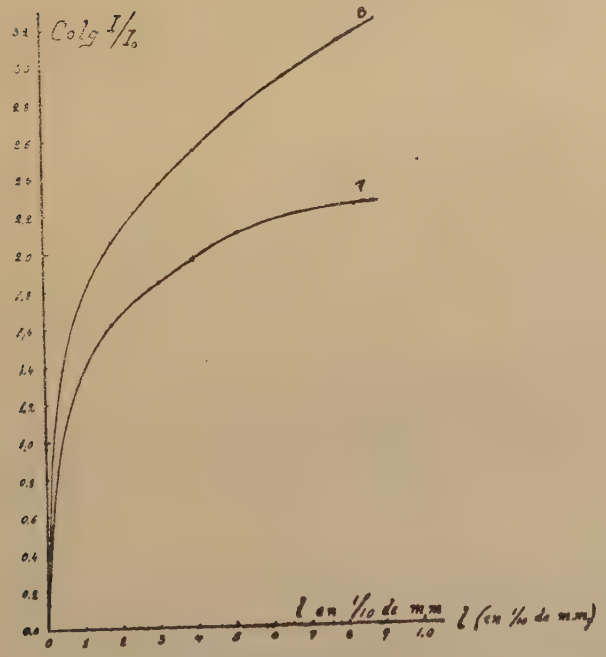


fig. 10

Ensemble des courbes :

$$\text{Colg.}\frac{I}{I^0} = f\ (1)\ \text{(Bœuf)}$$

(mêmes notations que fig. 9)

fig. 11. Quelques courbes $colg \frac{I}{I_0} = f(l)$ pour diverses suspensions faites à partir du sang des espèces animales étudiées.

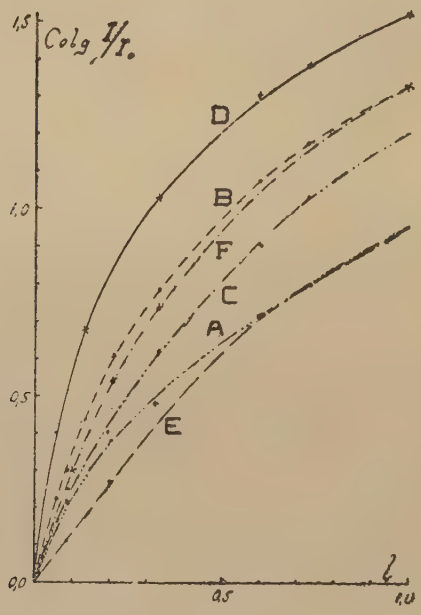


fig. 11

A Mouton N = 0,04
B Porc N = 0,031
C Lapin N = 0,036
D Bœuf N = 0,047
E Poule N = 0,023
F Chien N = 0,034

fig 12 courbes $\frac{I}{I_0} = f(l)$ correspondant à ces mêmes suspensions.

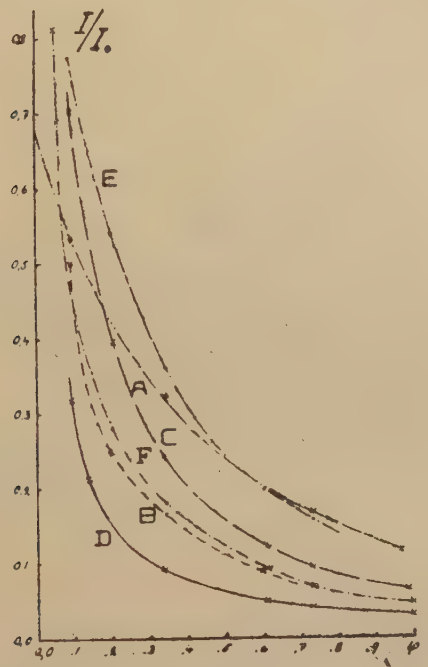


fig. 12

mêmes notations que fig. 11

d) *Essai de mise en équation de la fonction* $colg\frac{I}{I_0} = f(l)$. *Comparaison avec la représentation mathématique de la fonction* $colg\ I = f(N)$.

Si on essaie d'appliquer les formules empiriques données par *Vlès*, pour l'opacité en fonction de la concentration, au cas de l'opacité en fonction de l'épaisseur (pour les milieux troubles constitués par nos suspensions d'hématies), on est amené à constater que, ni *une* fonction hyperbolique du type $\frac{I}{I_0} = \frac{A}{l} + B$ ni *une* exponentielle telle que $\frac{I}{I_0} = e^{Alb}$

ni *une* équation différentielle $\frac{\Delta\omega}{\Delta l} = A\omega + B$ ne peuvent représenter les résultats obtenus sur une échelle assez étendue.

Pour se rendre compte de ce point, on construira pour chacune des concentrations :

a) $\frac{I}{I_0} = f\left(\frac{1}{l}\right)$ et on verra qu'il faut deux droites pour rendre compte de l'ensemble des points expérimentaux, dans le cas de chacune des suspensions étudiées.

b) lg colg $\frac{I}{I_0} = f(l)$ et là encore, deux droites pour chaque suspension permettront de représenter tous les résultats obtenus.

c) $\frac{\Delta\omega}{\Delta l} = f(\omega)$ et, comme pour l'application des deux lois empiriques précédentes, il faudra deux droites pour exprimer l'ensemble de la fonction.

Ici encore nous ne pouvons donner toutes les figures, aussi avons-nous reproduit :

fig. 13 ensemble des valeurs obtenues pour la fonction *lg colg* $\frac{I}{I_0} = f(\lg l)$ avec les suspensions d'hématies de Bœuf.

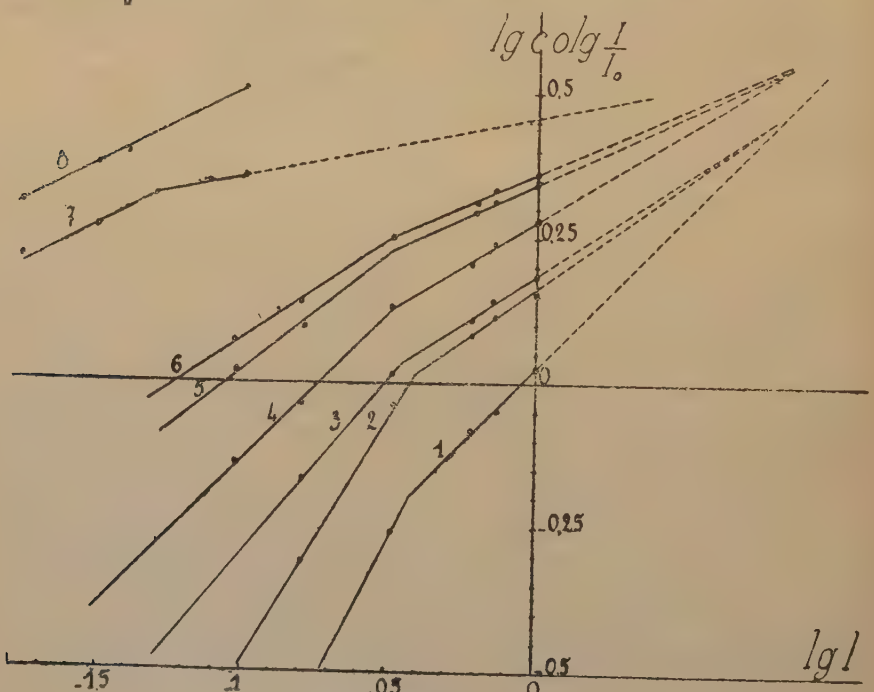


fig. 13

Ensemble des courbes :

log colg $\frac{I}{I_0}$ I = f(lgl)

fig. 14 courbes lg colg I = f(lgl) pour les suspensions déjà représentées sur les fig. 9 et 11.

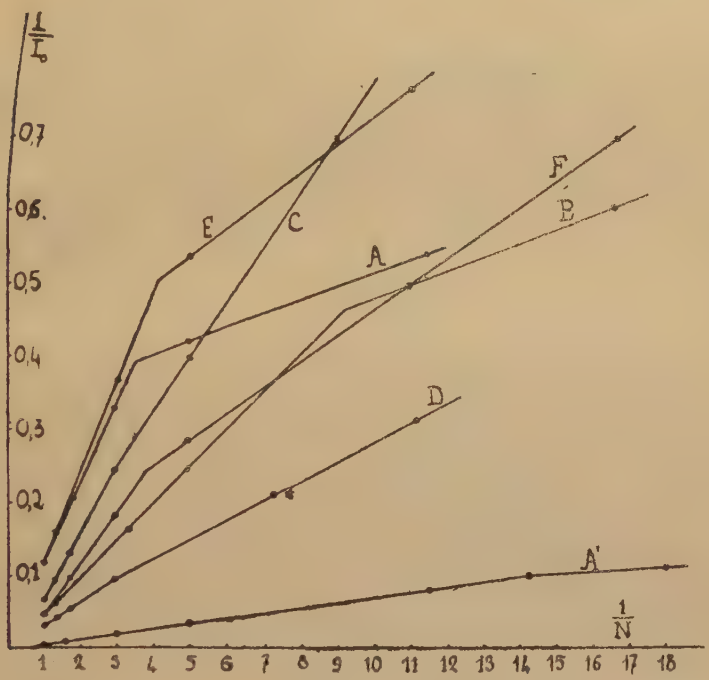


fig. 14

Courbes $\frac{I}{I_0} = f\left(\frac{1}{l}\right)$

pour quelques suspensions :

mêmes notations que fig. 11

A' Mouton N = 8.

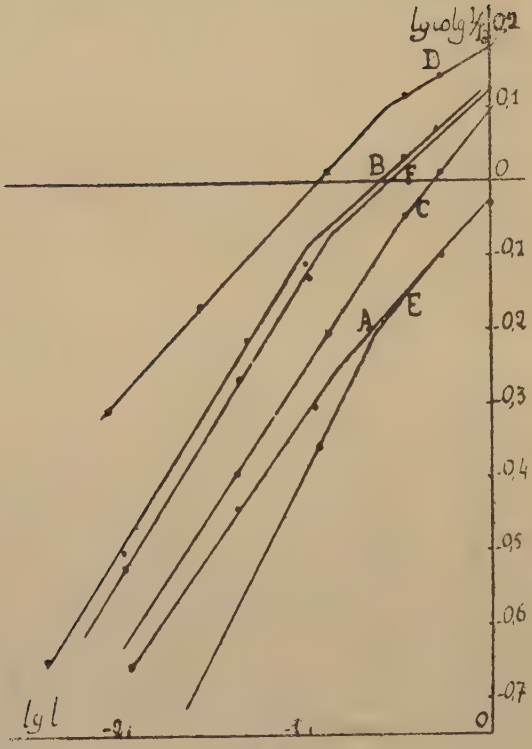


fig. 15

Courbes lg colg $\frac{I}{I_0} = f(l)$

pour quelques suspensions :
mêmes notations que fig. 11

fig. 16 courbes $\frac{\Delta\omega}{\omega} = f_\omega$ pour les suspensions précédentes.

(voir p. 41).

L'exponentielle de 1ère forme devrait devenir, si la concentration et l'épaisseur y entraient par leur produit nl. $\frac{I}{I_0} = e^{-K(nl)^\alpha}$

Donc $\lg \operatorname{colg} \frac{I}{I_0} = -(\lg K + \alpha \lg N + \alpha \lg l)$

par conséquent les courbes lg colg $\frac{I}{I_0} = f(\lg l)$ devraient être des droites $\alpha \lg l + B_i$ devrait être constant pour toute la famille de droites et on aurait $B = A \lg n + C$ avec $C = \lg K$.

Pour une même espèce animale, les droites correspondant aux différentes suspensions étudiées ne sont pas *parallèles*, cela

prouve que l'épaisseur n'entre pas, dans la loi d'absorption, avec un exposant constant ; mais avec un exposant variable et dépendant de la concentration.

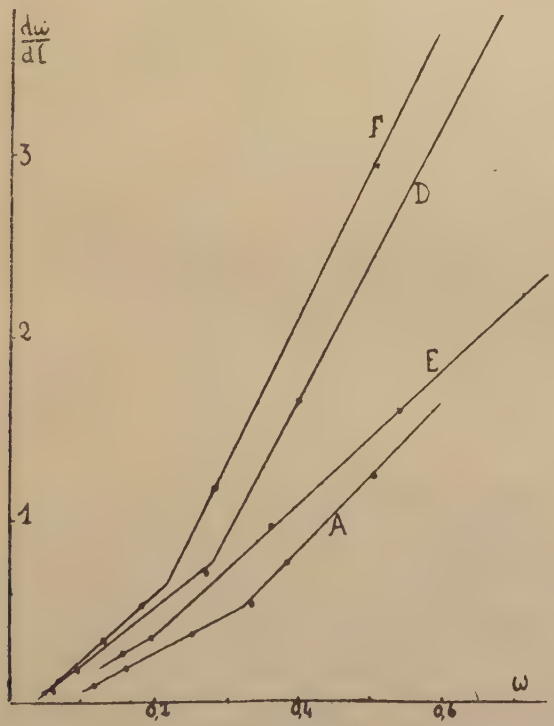


fig. 16

Courbes $\frac{d\omega}{dl} = f(\omega)$

pour quelques suspensions :
mêmes notations que fig. 11

On pourrait chercher un autre mode de représentation des faits (sommes d'exponentielles par exemple) mais cette *brisure* des droites obtenues nous a paru trop significative pour que nous n'essayons pas de l'interpréter.

Étant donné l'ensemble des courbes obtenues à partir du sang de Bœuf, nous pouvons relever les valeurs de concentration N et d'épaisseur l qui réalisent une absorption choisie à l'avance, faire le produit Nl et voir si ce produit est constant.

Colg $\frac{I}{I_0} = 1$			Colg $\frac{I}{I_0} = 1{,}8$		
N	l	Nl	N	l	Nl
0,027	0,9	0,0243	0,084	0,85	0,714
0,041	0,39	0,0159	0,136	0,41	0,558
0,049	0,30	0,0147	1,57	0,36	0,557
0,084	0,15	0,0126	2,50	0,028	0,700
0,136	0,07	0,0095	10	0,019	0,900
0,555	0,04(5)	0,0240			

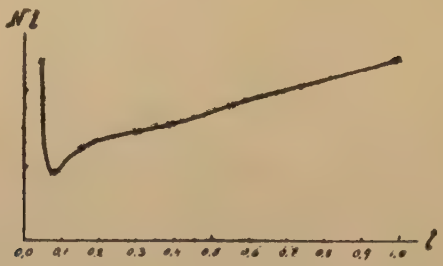


fig. 17

Valeurs du produit $N\ l$ réalisant une absorption donnée en fonction de l'épaisseur. (Pour colg $\frac{I}{I_0} = 1$)

Le produit $N \times l$ est proportionnel à la quantité de substance traversée par les rayons lumineux.

On voit que, pour avoir une absorption donnée, il ne suffit pas de prendre une même quantité de substance réalisable en jouant soit sur la concentration soit sur l'épaisseur.

On ne peut, sans faire de grossières erreurs, admettre que, pour une valeur donnée de colg $\frac{I}{I_0}$, le produit $N \times l$ est une constante.

La concentration d'une suspension et son épaisseur n'entrent donc pas avec le même exposant dans la loi de l'absorption et l'on ne peut compenser l'une par l'autre, tout au moins pour une échelle assez vaste.

e) *Interprétation par la lumière diffusée latéralement.*

Nous avons alors pensé pouvoir expliquer ces faits en introduisant la diffusion latérale de la lumière par les hématies, diffusion qui

peut ne pas être identique pour toutes les combinaisons de concentration et d'épaisseur. Nos mesures, faites avec l'appareil de Vernes, ont porté sur trois séries de suspensions. Nous donnons ici la côte de l'appareil en fonction de la concentration. Cette côté étant proportionnelle à l'épaisseur du biseau de compensation, on voit que, plus la lumière rejetée sur le côté sera intense, plus l'épaisseur du biseau (donc plus la côte) sera faible. Les mesures ont été faites avec l'écran de surcharge B, en lumière rouge, et avec un courant de 8 volts 1/2 dans la lampe.

Homme		Bœuf		Porc	
N	côte	N	côte	N	côte
0,048	26,	0,042.	20,2	0,082	20,7
0,170	22,	0,084	16,1	0,220	18,5
0,340	18,	0,168	12,4	0,570	13,3
0,510	15,6	0,320	12,7	0,860	12,6
0,610	13,8	0,640	13,5	1,290	12,4
1,020	13,	1,280	16,4	1,720	13,4
1,700	13,5	2,560	19,2		
2,550	14,1	5,120	22,9.		
3,400	15,3				
5,100	16,5				

On voit (fig. 18) que l'allure du phénomène est la même pour les trois espèces : augmentation de la lumière diffusée en fonction de la concentration, passage par un maximum puis décroissance (1).

Des résultats semblables ont été trouvés sur d'autres milieux troubles. TOLMAN, VLIET etc., l'ont décrit sur la silice colloïdale (voir mémoire de VLÈS p. *281 ;* voir aussi le mémoire de TEORELL).

(1) La différence entre les deux courbes relatives aux hématies de Bœuf et de Porc (voir figure) est intéressante à noter: on sait en effet que les hématies du Bœuf et du Porc ont des diamètres très voisins (diamètres de plus grande section). Donc ou les hématies ne sont pas semblables, ou autre chose que la surface des particules joue dans la diffusion pour des corpuscules de cet ordre de grandeur.

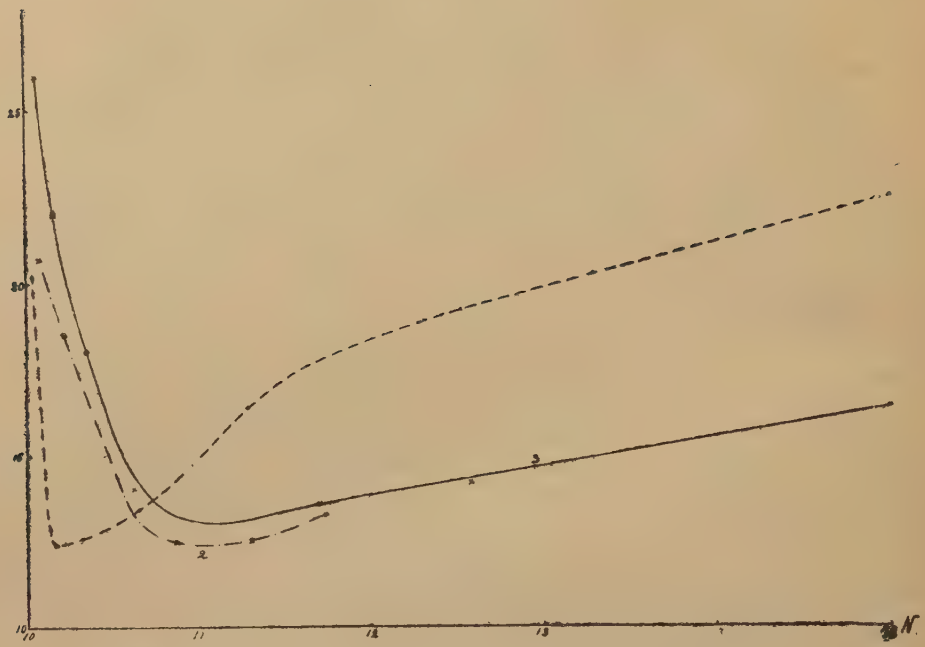


fig. 18

Lumière diffusé latéralement : côtes de l'appareil de Vernes en fonction de la concentration.

——— Homme

—·—·— Porc

— — — Bœuf

Deux phénomènes jouent : d'une part la diffusion de la lumière par chaque élément, et d'autre part, la récupération d'une partie de cette lumière diffusée par les corpuscules en suspension. La courbe obtenue expérimentalement traduit la résultante des deux phénomènes.

Nous n'avons pas encore étudié la diffusion sur le côté en fonction de l'épaisseur de substance traversée.

Si nous admettons ces possibilités de récupération, il nous est facile d'interpréter les *brisures* des droites logarithmiques obtenues dans l'étude de l'opacité en fonction de la concentration et de l'épaisseur.

Les pentes des droites logarithmiques sont plus fortes en suspension diluée qu'en suspension concentrée : les suspensions diluées correspondent à un territoire où la diffusion sur le côté est grande par rapport à la récupération ; pour les suspensions concentrées au contraire la récupération devient importante et on comprend que, dans le deuxième cas,

l'opacité dans le sens de propagation du rayon lumineux croisse moins vite que dans le premier. Notons qu'avec le Vernes nous avons opéré avec une intensité plus forte qu'au spectrophotomètre Glan, ce qui a permis d'atteindre et de dépasser le maximum.

Si les conditions de diffusion de la lumière ne sont pas les mêmes quand on diminue la quantité de subsatance en agissant sur la concentration ou sur l'épaisseur, on peut s'attendre, même dans une échelle limitée de valeurs, à ne pas pouvoir compenser dans tous les cas une des variables par l'autre. C'est ce que montre l'expérience suivante. Nous sommes partis d'une suspension d'hématies de Bœuf et nous avons fait à partir de cette suspension initiale deux séries de mesure: dans la première série, nous avons diminué la concentration et dans la deuxième l'épaisseur.

Epaisseurs	Colg $\frac{I}{I_0}$	Concentrations relatives à celle de la sespension initiale	Colg $\frac{I}{I_0}$
1,	2,30	1,	2,30
0,74	2,12	0,8	2,23
0,60	1,995	0,6	2,08
0,46	1,89	0,4	1,90
0,36	1,75	0,2	1,50
0,25	1,53	0,1	1,08
0,09	0,77		

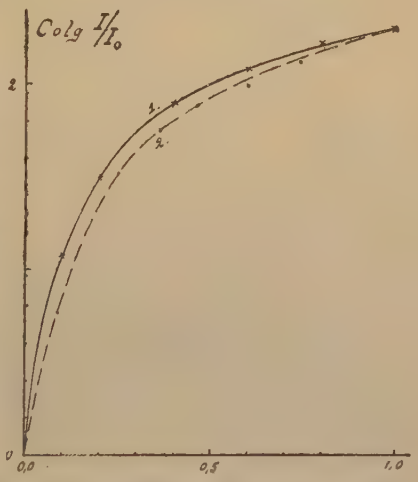


fig. 19

(1) Colg $\frac{I}{I_0}$ = f(N) (2) Colg $\frac{I}{I_0}$ = f(l)

(*Sang de Bœuf*)

Dans ce cas, nous remarquons que la courbe des concentrations est au-dessus de celle des épaisseurs. Nous pourrions multiplier les exemples (nets surtout dans le cas des suspensions faites avec de petites hématies, ces écarts tendent vers zéro, quand le volume particulaire augmente: sang de chien ou d'homme, — pour des absorptions variant entre colg $\frac{I}{I_0}$ = 0,8 et colg $\frac{I}{I_0}$ = 2,5—,

Or il est facile de voir que, lorsque nous faisons varier l'épaisseur nous laissons constante la distance entre les particules; au contraire quand nous diminuons la concentration nous augmentons cette distance interparticulaire. La lumière qui arrive sur les particules, ainsi que nous l'avons déjà vu, a deux origines: lumière transmise à travers l'excipient ou les hématies et lumière diffusée à la surface de certaines éléments et récupérée par d'autres. Or les conditions de récupération ne sont pas les mêmes dans un milieu trouble dont les éléments sont rapprochés que dans une suspension où les éléments sont écartés les uns des autres.

f) *Comparaison entre les courbes obtenues pour diverses espèces animales.*

Nous avons ensuite cherché à comparer entre elles les courbes $\text{colg}\frac{I}{I_0} = f(l)$ obtenues à partir d'hématies de diverses espèces animales.

Pour rendre cette comparaison plus facile, nous sommes partis pour chaque espèce animale *d'une même absorption,* pour une épaisseur égale à l'unité (fig. 20).

Absorption initiale $\text{colg}\frac{I}{I_0} = 2.50$

Poule		Bœuf		Mouton		Homme		Chien		Porc		Lapin	
l	$\text{colg}\frac{I}{I_0}$	l	$\text{colg}\frac{I}{I_0}$	l	$\text{colg}\frac{I}{I_0}$	l	$\text{colg}\frac{I}{I_0}$	l	$\text{colg}\frac{I}{I_0}$	l	$\text{colg}\frac{I}{I_0}$	l	$\text{colg}\frac{I}{I_0}$
1,00	2,50	1,00	2,50	1,00	2,50	1,00	2,50	1,00	2,50	1,00	2,50	1,00	2,50
0,73	2,23	0,74	2,30	0,74	2,26	0,73	2,35	0,73	2,30	0,73	2,37	0,74	2,30
0,60	2,04	0,60	2,18	0,50	2,00	0,60	2,25	0,60	2,20	0,33	1,94	0,60	2,16
0,34	1,62	0,46	2,06	0,32	1,46	0,34	1,95	0,33	1,87	0,21	1,66	0,34	1,87
0,20	1,38	0,36	1,90	0,06	1,00	0,21	1,63	0,10	1,32	0,04	0,93	0,20	1,62
0,09	1,00	0,25	1,68			0,08	1,16	0,005	0,58			0,08	1,22
0,04	0,64	0,09	0,83									0,05	1,04
												$8,02_5$	0,78

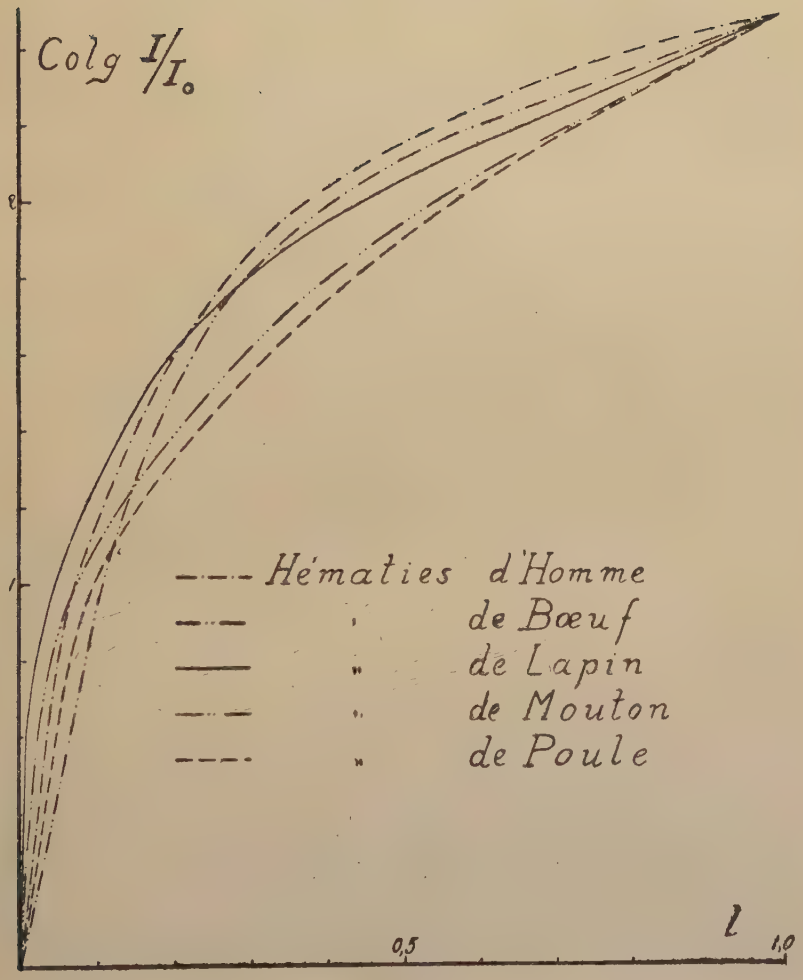


fig. 20

On voit que les courbes obtenues ne sont pas en coïncidence, ce qui tient à la différence des conditions de diffusion par des particules qui ne sont pas identiques entr'elles (volume différent, forme non semblable, constitution particulaire différente).

Si nous cherchons à comparer entr'eux les nombres d'hématies de diverses espèces animales donnant une même absorption sous une même épaisseur, nous aboutissons, aux résultats suivants:

	Pour $\text{colg}\frac{I}{I_0}=2$ sous 1 cm d'épaisseur	diamètre en μ	Pour $\text{colg}\frac{I}{I_0}=0{,}40$ sous 0,20 cm d'épaisseur
Bœuf	0,110	5,8	0,037
Poule	0,120	$d_1=12{,}5$ $d_2=7{,}6$	,038
Lapin	0,120	7,2	0,025
Chien	0,210	6,7	0,036
Porc	0,240	6,2	0,023
Mouton	0,300	4,9	0,044

La sériation est à peu près l'inverse de celle des diamètres pour $\text{colg}\frac{I}{I_0}=2$; remarquons toutefois que les hématies de Bœuf y occupent une place anormale. D'ailleurs en prenant une autre valeur de l'absorption, $\text{colg}\frac{I}{I_0}=0{,}40$ par exemple, on aboutit à un autre classement, ce qui ne doit aps nous surprendre étant données les différences des conditions de diffusion.

On voit donc que la quantité de substance n'est pas seule en jeu dans l'expression de l'opacité, quand on explore un matériel homogène comme les suspensions d'hématies. Si cette variable suffit pour rendre compte des faits quand on compare des particules de dimensions très différentes, lorsqu'on analyse de plus près les phénomènes dans un domaine restreint, on voit, qu'en seconde approximation, il faut tenir compte de la *manière*, dont est réalisée la quantité de substance : *épaisseur de la cuve, volume particulaire, nombre d'éléments ;* et, d'autre part, on ne doit pas négliger les conditions de diffusion de la lumière au niveau de chaque particule (*volume élémentaire, forme, constitution* amenant à une certaine valeur de l'indice de réfraction, différence entre l'indice de la particule et celui de l'excipient qui peut ne pas être négligeable dans le cas de nos expériences).

Conclusions.

Les recherches qui font l'objet de ce mémoire ont porté sur la posibilité de combiner des mesures de viscosité et d'opacité pour déterminer le nombre d'hématies d'une suspension et le volume particulaire moyen. Ces déterminations pouvant être appliquées au cas du sang humain, il est intéresant de discuter avant tout les bases physiques des méthodes utilisées.

1) Une série de mesures de viscosité, faites à partir de suspensions d'hématies de Bœuf de concentrations variables (Viscosité relative par rapport à l'excipient) a montré que l'on ne peut représenter, d'une façon suffisamment approchée, la fonction $\frac{\eta}{\eta_0} = f(N)$ par les formules classiques (EINSTEIN, HATSCHEK, ARRHÉNIUS, HESS, KUNITZ). Nous avons alors proposé une formule empirique du type $\frac{\eta_1}{\eta_0} = AN^B$ qui rend bien compte des faits pour des concentrations comprises entre 2 et 10 millions par mm^3. Aux concentrations plus faibles, on constate des écarts tenant sans doute au gonflement des hématies, et à des modifications de leur équilibre avec l'excipient en suspension diluée.

2) Si l'on détermine l'opacité de ces suspensions et qu'on essaye de leur appliquer les lois empiriques données par VLÈS en 1921, on voit qu'une seule formule ne rend pas compte de l'ensemble des faits: il faut en admettre deux du même type: l'une pour les fortes concentrations, l'autre pour les faibles. L'écart des résultats obtenus aux faibles concentrations par rapport à la loi des fortes concentrations n'est pas susceptible de la même explication que dans le cas de la viscosité. Ici il faudrait admettre un volume particulaire moyen plus petit aux faibles concentrations qu'aux fortes pour rendre compte des écarts, contrairement à ce que nous avons dû supopser dans les cas des courbes de viscosité.

3) Nous avons alors étudié l'opacité en fonction de l'épaisseur de suspension traversée par les rayons lumineux. En réduisant l'épaisseur on diminue la quantité de substance sans introduire de changement de définition des milieux étudiés. Nos mesures ont porté sur des suspensions faites avec du sang de diverses espèces animals: *Bœuf, Lapin, Mouton, Chien, Porc, Poule.*

Les courbes d'opacité en fonction de l'épaisseur sont du même type que les courbes d'opacité en fonction de la concentration. Nous avons cherché à interpréter ce résultat en étudiant la variation de lumière diffusée latéralement avec la concentration.

4) Les mesures de diffusion en fonction de la concentration, faites avec l'appareil de Vernes, ont montré que, dans le cas des suspensions d'hématies, on avait des résultats comparables à ceux obtenus sur d'autres milieux troubles : croissance de la lumière diffusée, passage par un maximum, puis décroissance en fonction de la concentration. Ceci permet d'interpréter les anomalies observées.

5) On voit en particulier que la concentration et l'épaisseur ne jouent pas le même rôle dans la détermination de l'opacité de nos suspensions et qu'on ne peut compenser, dans tous les cas, une variation de l'une par une variation inverse de l'autre.

6) Si l'on s'adresse à des suspensions faites à partir de diverses espèces animales, on voit que, en partant pour toutes ces suspensions d'une même absorption sous une épaisseur de 1 cm., en réduisant l'épaiseur et en mesurant l'opacité, on n'obtient pas une courbe unique. Cela tient aux conditions de diffusion (surface, volume, constitution des hématies) variables d'une espèce à l'autre.

Ces conclusions montrent que ces méthodes seraient intéressantes à appliquer au cas du sang humain, normal ou pathologique.

VU : VU :

Le Président de thèse : Le Doyen :

VLÈS MERKLEN

VU ET PERMIS D'IMPRIMER

Le Recteur de l'Académie de Strasbourg :

Chr. PFISTER.

Bibliographie.

ACHARD G. — Recherches viscosimétriques sur les suspensions d'hématies. — *Arch. Phys. biol. III,* pp. 239-274, 1924.

— Sur la combinaison des mesures de densité optique et de viscosité d'une suspension, pour la détermination du nombre et du volume des éléments diseprsées. — *C. R. Ac. Sc. 192,* p. 242, 1931.

ARRHÉNIUS Sv. — Viskosität und Hydratation kolloïdaler Lösungen. — *Meddelanden Fränk. K. Vetenskapsakademiens Nobelinstitut III,* pp. 1-20, 1917.

BANCELIN. — La viscosité des émulsions. *C. R. Ac. Sc. 152,* p. 1382, 1911.

BANCELIN M. — Ueber die Viskosität von Suspensionen und die Bestimmung des Avogadro'schen Zahl. — *Kolloïd-Zeitschrift IX,* pp. 154-156, 1911.

BIRCHER. — Die Beziehung zwischen der Viskosität des Blutes und dessen Gehalt an Blutkörperchen und gelöstem Eiweiss. — *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie 182,* pp. 1-28, 1920.

BOTAZZI F. et d'ERRICO G. — Physiko-chemische Untersuchungen über das Glykogen. — *Archiv für die gesamte Physiologie* (Pflüger). *115,* pp. 359-386, 1906.

BOUTARIC A. — Contribution à l'étude du pouvoir absorbant de l'atmosphère terrestre (Thèse) Gauthiers-Villars, Paris 1918.

— Sur une méthode permettant de suivre la variation du nombre des particules au cours de l'évolution d'une solution colloïdale. Application au sérum sanguin. — *C. R. Ac. Sc. 191,* N° 25, pp. 1332-1335, 22 déc. 1930.

— Sur une méthode simple pour suivre l'évolution d'une solution colloïdale. — *Revue générale des Sciences XLII,* p. 322, 1931,

CHENEVEAU et AUDUBERT. — *C. R. Ac. Sc. 168,* 1919.

p. 553. Sur l'absorption par les milieux troubles. Influence du diamètre et du nombre des particules.

p. 684. Sur l'absorption par les milieux troubles. Dispersion par diffusion intérieure.

p. 766. Sur l'absorption par des milieux troubles. Application au dosage des suspensions.

p. 937. Sur la vitesse de la lumière dans les milieux troubles.

— Sur quelques propriétés optiques des milieux troubles. *Ann. de Phys.* 1920.

Sur un néphélémètre. — Soc. Phys. N° 139, 16 avril 1920.

Même titre.

C. R. Ac. Sc. 170, p. 728, 1920.

Journ. de Phys. II, p. 19, 1921.

CHICK H. et MARTIN C. J. — Dis Viskosität von Kasein-Solen. — *Kolloïd-Zeitschrift, XI,* pp. 102-105, 1912.

CHICK H. et LUBERZYNSKA E. — The viscosity of some protein solutions. — *Biochem. Journ. VIII,* pp. 59-69, 1914.

CHICK. — The viscosity of Protein Solutions, II Pseudoglobulin and Euglobulin (Horse). — *Biochemical Journal VIII,* pp. 261-281, 1914.

DUCLAUX (Jacques). — Viscosité et Rigidité des liquides. Conférence faite devant la Société de Chimie physique le 12 mars 1930. Albert Blanchard, Paris 1930.

EINSTEIN. — Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. — *Annalen der Physik und Chemie, 19,* pp. 289-305, 1906.

— Berichtigung zu meiner Arbeit «Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen». — *Annalen der Physik. 34,* pp. 591-592, 1911.

GARNETT. — Colours in Metal Glasses and in Metallic Films. — *Philosophical transactions 203,* pp. 385-420, 1904.

— Colours in Metal Glasses, in Metallic Films and in Metallic Solutions II. — *Philosophical transactions, 205,* pp. 237-288, 1906.

HATSCHEK E. — Die Viskosität der Dispersoïde. — *Kolloïd. Zeitschrift. VII*, pp. 301-304, 1910.

— Dis Viskosität der Dispersoïde. — *Kolloïd. Zeitschrift VIII*, pp. 34-39, 1911.

— The general theory of viscosity of two-Phase Systems. — *Transaction of the Faraday Society, IX*, pp. 80-92, 1913.

The viscosity and hydratation of colloïdal solutions. — *Biochemical oJurnal. X*, pp. 325-330, 1916.

— Die Viskosität des Flüssigkeiten, 225 pages, 88 fig., 30 tableaux. — Steinkopff, Dresde et Leipzig, 1929.

HENRI, Victor. — The determination of the size of Colloïdal particules. — *Transactions of Faraday Sosiety, IX*, pp. 47-53, 1913.

HESS. — Beitrag zur Theorie des Viskosität heterogener Systeme. — *Kolloïd. Zeitschrift, XXVII*, pp. 1-11, 1920.

HOLKER. — *Biochem. Journ. 15*, p. 226, 1921.

JACOBS. — Osmotic properties of the erythrocytes. — I. Introduction. A simple method for studying the rate of hemolysis. — *The Biological Bulletin LVIII*, pp. 104-122, 1930.

KIRCHHOF. — Ueber den Einfluss des Lösungsmittels auf die Viskosität von Kautschuklösungen. — *Kolloïd. Zeitschrift XV*, pp. 30-36, 1914.

KUNITZ. — An empirical formula for the relation between viscosity of solution and volume of solute. — *Journal General Physiology IX*, pp. 715-725, 1926.

LOEB J. — La théorie des phénomènes colloïdanx (traduit par Mouton), Alcan, Paris, 1925.

ODEN Sven. — Physikalisch-chemische Eigenschaften des Schwefelhydrosole. — *Zeitschrift für Physikatische Chemie, 80*, pp. 709-736,, 1912.

PULVERMACHER. — Zur Kenntnis wässeriger Lösungen. — *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. 113*, pp. 141-149, 1920.

SMOLUCHOWSKI. — Theoretische Bemerkungen über die Viskosität der Kolloïde. — *Kolloïd. Zeitschrift, XVIII,* p. 190, 1916.

TEORELL TORSTEN. — Photometrische Messung der Konzentration und Dispersität in kolloïden Lösungen.
I Kolloïd-Zeistchrift, *53,* pp. 322-338, 1930.
II " " *54,* pp. 58-66, 1931.
III " " *54,* pp. 150-156, 1931.

TOLMANN, REYERSON, VLIET, GEIKE, BROOKS. — Relation between the intensity of Tyndall beam and concentration. — *Journ. Am. Chem. Soc. XLI,* p. 300, 1919.

TREVAN F. W. — *Bioch. Journ. 12,* p. 60, 1918.

VLES F. — Propriétés optiques des suspensions bactériennes. — *C. R. Ac. Sc. CLXVIII,* p. 575, 1919.
— Sur la transmission des émulsions de bactéries et d'hématies. — *C. R. Ac. Sc. CLXVIII,* p. 794, 1919.
— Recherches sur quelques propriétés optiques des suspensions biologiques et leur application à l'opacimétrie bactérienne. — *Arch. Phys. biol. I,* pp. 189-300, 1921.
— Physico-chimie des pétroles. — Vigot, Paris, 1925.
— Précis de chimie-physique, — Vigot, Paris, 1929.

Table des Matières.

Introduction 1

I Relation entre la viscosité des suspensions d'hématies et le nombre d'éléments dispersés 4

a) Définitions 4

b) Technique. Résultats obtenus sur le sang de Bœuf 5

c) Formules classiques donnant la viscosité d'un milieu trouble en fonction du volume de substance dispersée 6

d) Discussion de leur valabilité pour les suspensions d'hématies 13

e) Formule empirique proposée 16

II Relation entre l'opacité et le nombre d'hématies en suspension 18

a) Étude bibliographique des recherches effectués sur l'absorption de la lumière par les milieux troubles: Formules théoriques empiriques 18

b) Nos recherches sur les suspensions d'Hématie de Bœuf 21

c) Application des formules du paragraphe a) Résultats. Discussion 22

III Relation entre l'opacité d'une suspension d'hématies et l'épaisseur de substance traversée par la lumière 28

a) Intérêt du problème 28

b) Technique 28

c) Résultats obtenus 30

d) Essai de mise en équation de la fonction colg $I = f(l)$ comparaison avec la représentation mathématique de la fonction colg $I = f(N)$ 37

e) Interprétation par l'étude de la lumière diffusée latéralement 42

f) Comparasions entre les courbes obtenues pour diverses espèces animales 46

Conclusions 49

Bibliographie 51

ERRATA.

———

Page 1 ligne 19 au lieu de densité *lire* concentration.
Page 2 ligne 5 au lieu de rayon *lire* volume.
Page 8 ligne 1 fin de la ligne supprimer (1).
Page 10 ligne 23 supprimer a
Page 12, tableau 4e colonne, 6e case *au lieu de* à partir de la loi de Stockes *lire* Ostwald.
Note 1, avant dernière ligne au lieu de portion *lire* question.
Page 18, ligne 9, au lieu de mstic *lire* mastic.
Page 19, note (1) 3e ligne, *au lieu de* $c^{Ax\beta}$ *lire* $e^{Ax\beta}$
Page 26, ligne 8, au lieu d'hémoglobine *lire* oxyhémoglobine.
ligne 19 après :

$$\frac{I}{I_0} = 0{,}877 \text{ pour l'oxyhémoglobine seule,}$$

Ajouter
Si l'on considérait le pigment *entièrement* à l'état :

1) d'hémoglobine réduite on trouverait $\frac{I}{I_0} = 0{,}428$.
2) de méthémoglobine alcaline " 0,428
3) de " acide " 0,355

On voit donc le rôle que peut jouer l'état du pigment. Notons cependant que les valeurs obtenues dans les différents cas n'atteignent pas le nombre tiré de l'équation.

On doit se poser la question du spectre donné par le pigment *dans l'hématie* comparé au spectre du pigment en solution. A ce sujet voir les expériences de Vlès page 246, Note 1, du mémoire déjà cité.

Page 40 ligne 4 *lire* $\frac{I}{I_0} = e^{-K(nl)^{\alpha}}$ *au lieu de* $\frac{I}{I_0} = e^{-K(nl)^{a}}$
ligne 6 *lire* $\alpha \lg 1 + B$; α devrait être constant, *au lieu de* $\alpha \lg 1 + B$ devrait être constant.

Page 44, figure 18, en *abscisses, lire* 0, 1, 2, 3, 4 5 *au lieu de* 10, 11, 12, 13, 14, 15.

Imprimerie
de la
Librairie Universitaire d'Alsace
Strasbourg 1931